

First Hit☐ **Generate Collection** **Print**

L4: Entry 101 of 127

File: DWPI

Mar 28, 2000

DERWENT-ACC-NO: 2000-298449

DERWENT-WEEK: 200026

COPYRIGHT 2004 DERWENT INFORMATION LTD

TITLE: gadolinium=bismuth-based bismuth substitution garnet thick film material for Faraday rotator/light isolator and its production method - is grown by the liquid phase epitaxial growth method on a garnet substrate

PATENT-ASSIGNEE:

ASSIGNEE

CODE

TOKIN CORP

TOHM

PRIORITY-DATA: 1998JP-0211923 (July 10, 1998), 1997JP-0368187 (December 27, 1997), 1998JP-0062311 (February 25, 1998), 1998JP-0089278 (March 17, 1998), 1998JP-0134340 (April 28, 1998), 1998JP-0152213 (May 14, 1998), 1998JP-0165920 (May 29, 1998), 1998JP-0194990 (June 24, 1998)

Search Selected**Search ALL****Clear**

PATENT-FAMILY:

PUB-NO	PUB-DATE	LANGUAGE	PAGES	MAIN-IPC
<input type="checkbox"/> JP 2000086396 A	March 28, 2000		033	C30B029/28

APPLICATION-DATA:

PUB-NO	APPL-DATE	APPL-NO	DESCRIPTOR
JP2000086396A	October 19, 1998	1998JP-0316960	

INT-CL (IPC): C30 B 29/28; G02 F 1/09

ABSTRACTED-PUB-NO: JP2000086396A

BASIC-ABSTRACT:

NOVELTY - A GdBi-based bismuth substitution garnet thick film material is a garnet thick film using Gd, Yb, Bi, Fe, and Al as its major constituents and grown by the liquid phase epitaxial growth method on a garnet substrate.

DETAILED DESCRIPTION - A GdBi-based bismuth substitution garnet thick film material is a garnet thick film using Gd, Yb, Bi, Fe, and Al as its major constituents and grown by the liquid phase epitaxial growth method on a garnet substrate. The garnet thick film consists of $\text{Gd}_{3-x}\text{Yb}_x\text{Bi}_y\text{Fe}_5\text{-zAl}_z\text{O}_{12}$. $0 < x =$ at most 0.45; 0.55 at most y at most 1.55; $0 < z =$ at most 0.95.

USE - The method produces the bismuth substitution GdBi-based garnet thick film material for a Faraday rotator, and a light isolator.

ADVANTAGE - The GdBi-based bismuth substitution garnet thick film material repels

absorption at a wavelength of about 1.6 μm or above substantially afforded by TbBi-based garnet and improves the temperature change of the Faraday's rotation angle of GdBi-based garnet.

CHOSEN-DRAWING: Dwg.0/59

TITLE-TERMS: BISMUTH SUBSTITUTE GARNET THICK FILM MATERIAL FARADAY ROTATING LIGHT ISOLATE PRODUCE METHOD GROW LIQUID PHASE EPITAXIAL GROWTH METHOD GARNET SUBSTRATE

DERWENT-CLASS: L03 P81 V07

CPI-CODES: L03-B02B3; L03-G02;

EPI-CODES: V07-K03;

SECONDARY-ACC-NO:

CPI Secondary Accession Numbers: C2000-090417

Non-CPI Secondary Accession Numbers: N2000-224246

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-86396

(P2000-86396A)

(43) 公開日 平成12年3月28日 (2000.3.28)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テリトリー (参考)
C 3 0 B 29/28		C 3 0 B 29/28	
G 0 2 F 1/09	5 0 1	G 0 2 F 1/09	5 0 1

審査請求 未請求 請求項の数13 F D (全 33 頁)

(21) 出願番号 特願平10-316960

(22) 出願日 平成10年10月19日 (1998. 10. 19)

(31) 優先権主張番号 特願平9-368187

(32) 優先日 平成9年12月27日 (1997. 12. 27)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願平10-62311

(32) 優先日 平成10年2月25日 (1998. 2. 25)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願平10-89278

(32) 優先日 平成10年3月17日 (1998. 3. 17)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000134257

株式会社トーキン

宮城県仙台市太白区郡山6丁目7番1号

(72) 発明者 佐藤 忠邦

宮城県仙台市太白区郡山6丁目7番1号

株式会社トーキン内

(72) 発明者 遠藤 和光

宮城県仙台市太白区郡山6丁目7番1号

株式会社トーキン内

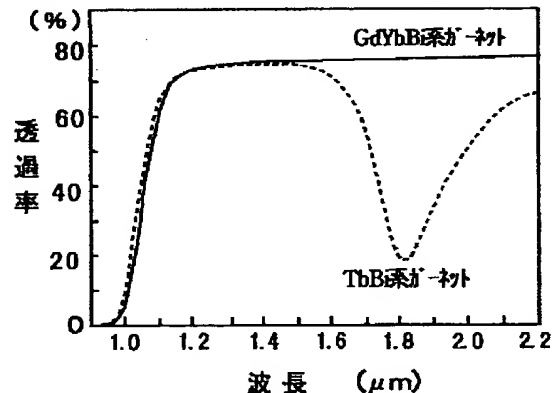
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ビスマス置換型ガーネット厚膜材料及びその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 TbBi系ガーネットが本質的に持っている波長約1.6 μm 以上の吸収を忌避するものであり、GdBi系ガーネットの θ_F の温度変化率の改善したビスマス置換型ガーネット厚膜材料及びその製造方法を提供し、更に、波長の中でも、約1.5 μm を越える波長帯域で使用できるファラデー回転素子を提供すること。

【解決手段】 ガーネット基板上に、液相成長法により育成されたGd、Yb、Bi、Fe及びAlを主成分とする光学用のガーネット厚膜であって、前記ガーネット厚膜の組成式が、 $\text{Gd}_{3-x-y}\text{Yb}_x\text{Bi}_y\text{Fe}_{5-z}\text{Al}_z\text{O}_{12}$ 、(ただし、 $0 < x \leq 0.45$ 、 $0.85 \leq y \leq 1.5$ 、 $0 < z \leq 0.95$ で表わされるGdBi系ガーネット厚膜材料。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 ガーネット基板に、液相成長法により育成された、Gd、Yb、Bi、Fe、Alを主成分とするガーネット厚膜であって、該ガーネット厚膜の組成式が、 $Gd_{3-x-y}Yb_xBi_yFe_{5-z}Al_zO_{12}$ （但し、 $0 < x \leq 0.45$ 、 $0.55 \leq y \leq 1.55$ 、 $0 < z \leq 0.95$ ）であることを特徴とするGdBi系ガーネット厚膜材料。

【請求項2】 ガーネット基板に、液相成長法により育成された、Gd、Yb、Bi、Fe、Gaを主成分とするガーネット厚膜であって、該ガーネット厚膜の組成式が、 $Gd_{3-x-y}Yb_xBi_yFe_{5-z}Ga_zO_{12}$ （但し、 $0 < x \leq 0.40$ 、 $0.55 \leq y \leq 1.10$ 、 $0.15 \leq z \leq 0.60$ ）であることを特徴とするGdBi系ガーネット厚膜材料。

【請求項3】 ガーネット基板に、液相成長法により育成された、Gd、Yb、Bi、Fe、Al、Gaを主成分とするガーネット厚膜であって、該ガーネット厚膜の組成式が、 $Gd_{3-x-y}Yb_xBi_yFe_{5-z}(Al_aGa_b)_zO_{12}$ （但し、 $0 < x \leq 0.50$ 、 $0.85 \leq y \leq 1.60$ 、 $0.20 \leq z \leq 1.00$ 、 $0.05 \leq a/(a+b) \leq 0.90$ ）であることを特徴とするGdBi系ガーネット厚膜材料。

【請求項4】 請求項1乃至3のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料中にPbOを0～4.0wt%（但し、0を含まず）含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料。

【請求項5】 請求項1乃至3のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料中にB₂O₃を0～4.0wt%（但し、0を含まず）含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料。

【請求項6】 請求項1乃至3のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料中にPtO₂が0～4.0wt%（ただし、0を含まず）含有されたことを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料。

【請求項7】 請求項1乃至3のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料中にB₂O₃及びPbOを各々0～4.0wt%（但し、0を含まず）含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料。

【請求項8】 請求項1乃至3のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料中にB₂O₃及びPbO及びPtO₂が各々0～4.0wt%（但し、0を含まず）の範囲で、かつ、3種類の合計が0～9.0wt%（但し、0を含まず）含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料。

【請求項9】 請求項1乃至8のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料から実質的になることを特徴とするファラデー回転素子。

【請求項10】 請求項9記載のファラデー回転素子からなることを特徴とする光アイソレータ。

2

【請求項11】 前記GdBi系ガーネット厚膜材料を、ネオジウム・ガリウム・ガーネット（NGG）基板に育成することを特徴とする請求項1乃至8のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料の製造方法。

【請求項12】 前記GdBi系ガーネット厚膜材料を、950～1140℃の範囲で保持する熱処理を施すことを特徴とする請求項1乃至8のいずれかに記載のGdBi系ガーネット厚膜材料の製造方法。

【請求項13】 前記熱処理における雰囲気中の酸素含有量が10～100%の範囲であることを特徴とする請求項12記載のGdBi系ガーネット厚膜材料の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ファラデー回転効果を有する光学用ガーネット材料の中で、ビスマス（Bi）置換型ガーネットとその製造方法に関し、詳しくは、液相エピタキシャル成長法（LPE法）にて育成したGdBi系ガーネット単結晶厚膜及びその製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】従来、光通信において、ファラデー回転を応用したデバイスが開発、実用化されている。半導体レーザ発振器を使用した光通信では、光ファイバケーブルやコネクタなどからの反射光が発振部に戻ると、発振が不安定となったり、停止する状態となる。それゆえ、半導体レーザへの戻り光を遮断し、安定した発振状態を確保するために、光アイソレータが使用されている。

【0003】大きなファラデー回転を有するBi置換型希土類鉄ガーネットは、LPE法、フラックス法等で育成され、近赤外線領域でのアイソレータに使用されている。特に、LPE法で育成されるガーネット厚膜は、生産性に優れ、現在では、ほとんどがこの方法で生産されている。

【0004】現在、ファイバケーブルを用いた長距離の通信には、波長が1.31μmと1.55μmの帯域が使用されている。また、光通信網の監視等に約1.6～2.0μmの範囲にある波長が使用される。

【0005】近赤外線用ファラデー回転素子用材料として、LPE法で作製されたTbBi系ガーネット厚膜とGdBi系（Ga、Al置換）ガーネット厚膜が市販されている。

【0006】前者は、ファラデー回転角θ_fの温度変化率θ_{f/T}が約0.04～0.06deg（度）/℃と小さいが、印加磁界強度H_sは約800～1200Oeと高く、強力な永久磁石を必要とするが、磁化反転温度T_{comp}は約-50℃以下であり、広い温度範囲で使用できる。

【0007】一方、後者は、θ_fの温度変化率θ

f/T が、約 $0.08 \text{ deg}/^\circ\text{C}$ と大きい、 H_s は約 3000 e と小さく、磁化反転温度 T_{comp} は約 -10°C と高いため、使用温度範囲は生活温度近傍である。従って、市場の要求は、温度特性の良好な TbBi 系ガーネット材が多くなっている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、希土類 Bi 系ガーネットにおいては、Journal of Applied Physics Vd.38, No.3, p.1038の“Effect of Impurities on the Optical Properties of Yttrium Iron Garnet”と題される文献に示されている図では、波長が $1.6 \mu\text{m}$ を越えた領域では、 Tb イオンに関係した吸収スペクトルが見られ、 TbBi 系ガーネット材は、この波長帯域においては、機能を失う可能性も推定される。

【0009】一方、 GdBi 系(Ga , Al 置換)ガーネット厚膜については、その製造条件等については、Journal of Crystal Growth 64 (1983)p.275の“LPE Growth of Bismuth Substituted Gadolinium Iron Garnet Layers: Systematization of Experimental Result”と題される文献に示されているが、 GdBi 系(Yb , Al 置換)ガーネット厚膜及び GdBi 系(Yb , Ga 置換)ガーネット厚膜及び GdBi 系(Yb , Al , Ga 置換)ガーネット厚膜の光学特性に関する示唆は見られない。

【0010】ここで、光アイソレータは、光の進行に関し、順方向には、より高い透過率を示し、逆方向には、より低い透過率を示すことが望ましい。

【0011】そこで、本発明の技術的課題は、 TbBi 系ガーネットが本質的に持っている波長約 $1.6 \mu\text{m}$ 以上の吸収を忌避するとともに、 GdBi 系ガーネットの θ_f の温度変化率 $\theta_{f/T}$ を改善したビスマス置換型ガーネット厚膜材料及びその製造方法を提供することにある。

【0012】又、本発明の他の技術的課題は、波長の中でも、特に、約 $1.5 \mu\text{m}$ を越える波長帯域で使用できるファラデー回転素子及びそれを用いた光アイソレータを提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明では、 GdBi 系ガーネット厚膜に対する具体的な要求特性を下記のごとくした。

(1) 約 $1.5 \mu\text{m}$ を越える波長帯域でも、高い透過率(低い挿入損失)を示すこと。

(2) ファラデー回転角 θ_f の $-20^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ の温度範囲での平均温度変化率 $\theta_{f/T}$ が、従来から市販の GdBi 系ガーネット材(約 $0.08 \text{ deg}/^\circ\text{C}$)よりも良好な $0.07 \text{ deg}/^\circ\text{C}$ 以下であること。

(3) 磁化反転温度 T_{comp} が、 -20°C 以下(通常的生活環境室温範囲で使用できる)であること。

(4) ファラデー回転角 θ_f が、約 45 deg となる厚

さにおける挿入損失(I.L.)が、 0.2 dB 以下(通常は 0.3 dB 以下で可)であること。

(5) 低下するガーネットの挿入損失(I.L.)が、飽和状態に達するために必要な最小の印加磁界(ガーネットの磁気スピンを一方に揃えるのに必要な飽和磁界 H_s)が、 5000 e 以下(大きな印加磁界を必要としないため、強力な永久磁石が不要となり、安価、小型化に有益)であること。

(6) ファラデー回転能 θ_f (以下、単に θ_f という)が従来と同等(波長 $1.62 \mu\text{m}$ における θ_f が $700 \text{ deg}/\text{cm}$)以上であること。

以上を、本発明におけるガーネット材料の適合範囲と規定した。

【0014】なお、ファラデー回転素子としては、ファラデー回転能 θ_f の大きい方が、素子としての膜厚を小さくすることができる。また、LPE法においては、育成膜厚が大となるに従い、結晶性の劣化、割れ発生の増加、育成時間の増加等、工業上、不利益となることが多い。

【0015】従って、厚い膜厚(約 $800 \mu\text{m}$ 以上)を必要とする場合、ファラデー回転素子を複数個、使用することが生じる。

【0016】しかしながら、使用数が増加するに従い、ばらつきの拡大、構成部材の増加、アイソレータ寸法の拡大、挿入損の増加等、コスト増大や性能低下等の不利益が著しく増大することになる。

【0017】従って、本発明においては、ガーネット厚膜の使用数が2個以下で可能な特性を有することを必須とした。これは、例えば、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における θ_f が $800 \text{ deg}/\text{cm}$ 以上であれば、このような条件を十分に満たすことになるので、これを θ_f の設定条件とした。

【0018】 θ_f は、単純な要因の変更によって、容易に変化できるものではなく、種々の溶液(メルト)組成及び育成条件の適合によって、最適化が図られ、実現できるものである。

【0019】その結果、 Gd , Yb , Bi , Fe , Al を主成分としたガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が $10 \sim 100\%$ の雰囲気中で、 $950 \sim 1140^\circ\text{C}$ の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0020】また、 Gd , Yb , Bi , Fe , Ga を主成分としたガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が $10 \sim 100\%$ の雰囲気中で、 $950 \sim 1140^\circ\text{C}$ の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0021】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Al, Gaを主成分としたガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0022】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Alを主成分とし、PbO又はB₂O₃又はPtO₂のいずれか1種類を0~4.0 wt% (0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0023】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Gaを主成分とし、PbO又はB₂O₃又はPtO₂のいずれか1種類を0~4.0 wt% (0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0024】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Al, Gaを主成分とし、PbO又はB₂O₃又はPtO₂のいずれか1種類を0~4.0 wt% (0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0025】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Alを主成分とし、B₂O₃及びPbOを各々0~4.0 wt% (但し、0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0026】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Gaを主成分とし、B₂O₃及びPbOを各々0~4.0 wt% (但し、0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0027】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Al, Gaを主成分とし、B₂O₃及びPbOを各々0~4.0 wt% (但し、0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0028】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Alを主成分とし、B₂O₃及びPbO及びPtO₂が各々0~4.0 wt% (但し、0を含まず) の範囲で、かつ、2種類以上の合計が0~9.0 wt% (但し、0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0029】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Gaを主成分とし、B₂O₃及びPbO及びPtO₂が各々0~4.0 wt% (但し、0を含まず) の範囲で、かつ、3種類の合計が0~9.0 wt% (但し、0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0030】また、Gd, Yb, Bi, Fe, Al, Gaを主成分とし、B₂O₃及びPbO及びPtO₂が各々0~4.0 wt% (但し、0を含まず) の範囲で、かつ、3種類の合計が0~9.0 wt% (但し、0を含まず) 含有するガーネット厚膜を①LPE法にて育成すること、②ガーネット厚膜をNGG基板上に育成すること、③ガーネット厚膜を酸素含有量が10~100%の雰囲気中で、950~1140℃の温度で保持する熱処理をすること、により、上記課題が解決され、本発明をなすにいたったものである。

【0031】即ち、本発明によれば、ガーネット基板上に、液相成長法により育成された、Gd, Yb, Bi, Fe, Alを主成分とするガーネット厚膜であって、該ガーネット厚膜の組成式が、Gd_{3-x-y}Yb_xBi_yFe_{5-z}Al_zO₁₂ (但し、0<x≤0.45, 0.55≤y≤1.55, 0<z≤0.95) であることを特徴とするGdB系ガーネット厚膜材料が得られる。

【0032】また、本発明によれば、ガーネット基板上に、液相成長法により育成された、Gd, Yb, Bi, Fe, Gaを主成分とするガーネット厚膜であって、該ガーネット厚膜の組成式が、Gd_{3-x-y}Yb_xBi_yFe_{5-z}Ga_zO₁₂ (但し、0<x≤0.40, 0.55≤y

≤ 1.10 , $0.15 \leq z \leq 0.60$)であることを特徴とするGdB i系ガーネット厚膜材料が得られる。

【0033】また、本発明によれば、ガーネット基板上に、液相成長法により育成された、Gd, Yb, Bi, Fe, Al, Gaを主成分とするガーネット厚膜であって、該ガーネット厚膜の組成式が、 $Gd_{3-x-y}Yb_xBi_yFe_{5-z}(AlGa)zO_{12}$ (但し、 $0.05 \leq a/(a+b) \leq 0.90$, $0 < x \leq 0.50$, $0.85 \leq y \leq 1.60$, $0.20 \leq z \leq 1.00$)であることを特徴とするGdB i系ガーネット厚膜材料が得られる。

【0034】また、本発明によれば、前記に記載のGdB i系ガーネット厚膜材料中にPbOを0~4.0wt% (但し、0を含まず) 含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料が得られる。

【0035】また、本発明によれば、前記に記載のGdB i系ガーネット厚膜材料中にB₂O₃を0~4.0wt% (但し、0を含まず) 含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料が得られる。

【0036】また、本発明によれば、前記に記載のGdB i系ガーネット厚膜材料中にPtO₂が0~4.0wt% (ただし、0を含まず) 含有されたことを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料が得られる。

【0037】また、本発明によれば、前記に記載のGdB i系ガーネット厚膜材料中にB₂O₃及びPbOを各々0~4.0wt% (但し、0を含まず) 含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料が得られる。

【0038】また、本発明によれば、前記に記載のGdB i系ガーネット厚膜材料中にB₂O₃及びPbO及びPtO₂が各々0~4.0wt% (但し、0を含まず) の範囲で、かつ、3種類の合計が0~9.0wt% (但し、0を含まず) 含有することを特徴とするビスマス置換型ガーネット厚膜材料が得られる。

【0039】また、本発明によれば、前記に記載のGdB i系ガーネット厚膜材料から実質的になることを特徴とするファラデー回転素子が得られる。

【0040】また、本発明によれば、前記ファラデー回転素子からなることを特徴とする光アイソレータが得られる。

【0041】また、本発明によれば、前記GdB i系ガーネット厚膜材料を、ネオジウム・ガリウム・ガーネット (NGG) 基板上に育成することを特徴とする前記のいずれかに記載のGdB i系ガーネット厚膜材料の製造方法が得られる。

【0042】また、本発明によれば、前記GdB i系ガーネット厚膜材料を、950~1140℃の範囲で保持する熱処理を施すことを特徴とする前記のいずれかに記載のGdB i系ガーネット厚膜材料の製造方法が得られる。

【0043】また、本発明によれば、前記熱処理にお

る雰囲気中の酸素含有量が10~100%の範囲であることを特徴とする前記のGdB i系ガーネット厚膜材料の製造方法が得られる。

【0044】ここで、本発明において、GdYbBi系 (Ga, Al置換) ガーネット厚膜を対象とした理由は、GdYbBi系 (Ga, Al置換) ガーネット厚膜材料では、1.6μm以上の波長帯域で光の吸収ピークが見られないからである。

【0045】また、LPE法によって育成する単結晶厚膜で、前記の光学用特性を満たすGdYbBi系ガーネット厚膜材料の組成は、各化学式において、 $0 < x \leq 0.45$, $0.55 \leq y \leq 1.55$, $0 \leq z \leq 0.95$ の範囲とした。

【0046】本発明において、GdYbBi系ガーネット厚膜材料を対象とした理由は、TbBi系ガーネット厚膜材料では、約1.5μm以上の波長領域で明らかな光吸収のピークが認められるのに対し、GdYbBi系ガーネット厚膜材料では、約1.2μm以上の波長領域で光の吸収ピークが見られないからである。

【0047】また、本発明において、xの範囲を $0 < x \leq 0.45$ としたのは、xの増加により $\theta_{f/T}$ が減少し、改善されること、および、xが0.45を超えると、飽和磁化4πMsが500G以上となるためである。

【0048】また、yの範囲を $0.55 \leq y \leq 1.55$ としたのは、yが0.55を超えると、ファラデー回転能が500deg/cm以上となり、yが1.55を超えると、挿入損失が急激に増加するからである。

【0049】さらに、zの範囲を $0 < z \leq 0.95$ としたのは、zの増加とともに飽和磁化4πMsは減少するが、zが0.95を超えると、 $\theta_{f/T}$ が急激に増加する傾向があるからである。これらの特性の変化は、結晶を構成する各イオンの磁気モーメント等に起因する。

【0050】また、本発明において、単結晶厚膜の熱処理温度範囲を950~1140℃としたのは、950℃未満の温度では、結晶中の原子の均質化が十分でなく、挿入損失の低減は認められず、1140℃を越える温度では、GdYbBi系ガーネット結晶で、とくにBi₂O₃の蒸発による分解のために、挿入損失が増大するからである。

【0051】さらに、本発明のガーネット厚膜材料において、B₂O₃、PbO、PtO₂の内の1種類を0~4.0wt% (0を含まず) 含有するか、もしくは2種類以上を0~9.0wt% (0を含まず) 含有するとしたのは、この範囲の含有量で挿入損失 (I.L.) が減少することを見出したためである。なお、B₂O₃、PbO、PtO₂の含有による挿入損失 (I.L.) の低減効果は、ガーネット組成における結晶構成元素のイオン状態を調整する効果と推察される。

【0052】また、本発明において、光学用ガーネット厚膜をLPE法によりNGG基板上に育成するのは、本

育成法において、よく使用されているSGGG基板よりも、やや格子定数の大きいNGG基板の方が、本発明におけるガーネット膜との適合性がよく、500 μ mを越えた厚膜を育成しても、SGGG基板上の育成に比べて、著しく割れ発生が低減できるからである。

【0053】ちなみに、使用波長が長くなるに従い、必要な膜厚が大となる。従って、高厚膜に育成できることは、実用上、極めて有益となる。

【0054】また、本発明のガーネット厚膜材料を製造する方法において、ガーネット厚膜材料を950～1140℃の範囲で保持する熱処理をするのは、この範囲において、挿入損失(I.L.)の低減効果が認められ、950℃未満では、温度が低いために、組成の均質化が不十分であり、1140℃を越えると、ガーネットの分解(含有するBi₂O₃、の蒸発)が生ずるためである。

【0055】なお、熱処理による挿入損失(I.L.)の低減は、原子の拡散による均質化の向上(結晶格子、イオンバランスのばらつき低減)に起因している。

【0056】また、本発明のガーネット厚膜材料を製造する方法において、熱処理における雰囲気酸素含有量が5%以上の範囲とするのは、これ以上での熱処理による効果が認められるからであり、5%未満では、酸素の欠乏により、挿入損失(I.L.)が増大するためである。

【0057】なお、本発明のガーネット厚膜材料の主成分の組成値による特性の変化は、結晶格子における各原子の置換と磁気スピンに深く関係しており、本発明の組成領域は、光学特性の最適領域となっている。

【0058】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について説明する。

【0059】光アイソレータ等に用いられるファラデー回転素子等用のBi置換型ガーネットの液相成長法(LPE法)は、次のようにして行われる。

【0060】まず、白金つぼの中に、PbO、Bi₂O₃、B₂O₃等をフラックス成分とし、ガーネット成分(Gd₂O₃、Yb₂O₃、Tb₂O₃、Fe₂O₃、Al₂O₃、Ga₂O₃等)を約900～1100℃にて溶解して、溶液(メルト)を作製した後、降温し、過冷却状態(過飽和溶液状態)とする。そのメルトにガーネット基板を浸漬し、長時間、回転することにより、Bi置換型ガーネットの厚膜を育成する。

【0061】このBi置換型ガーネットの中でも、GdBi系ガーネットは、比較的高いファラデー回転能 θ_F を有し、ガーネットに対する必要印加磁場が小さくて済むといった特徴を有している。ここでいう必要印加磁場(飽和磁界H_s)とは、ガーネットの挿入損失低下が、飽和状態に達するために、必要な最小の磁場である。尚、物理的には、ガーネットの磁気スピンを一方向に揃えるのに必要な磁界である。

【0062】一般に、この印加磁界は、ガーネット膜の周辺に配置した永久磁石から供給される構成となっている。従って、ガーネット膜の飽和磁化4 π M_sが低いと、H_sも低くなり、使用する磁石の特性が低くできる。又、小型化、軽量化等が可能となり、工業上、有益となる。

【0063】なお、本発明のGdBi系ガーネット厚膜材料の主成分の組成値による特性の変化は、結晶格子における各原子の置換と磁気スピンに深く関係しており、本発明の組成領域は、光学特性の最適領域となっている。

【0064】

【実施例】以下、本発明の実施例について、図面を参照して、詳細に説明する。

【0065】(実施例1)高純度の酸化ガドリニウム(Gd₂O₃)、酸化イットルビウム(Yb₂O₃)、酸化第二鉄(Fe₂O₃)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)、酸化ビスマス(Bi₂O₃)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B₂O₃)の粉末を使用した。これらの粉末を使って、PbO-Bi₂O₃-B₂O₃系をフラックスとするLPE法によって、NGG基板(化学式Nd₃Ga₅O₁₂)上に、Gd_{1.7}Yb_{0.1}Bi_{1.2}Fe_{4.7}Al_{0.3}O₁₂なる組成のGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜を、厚さ約700 μ m育成した。

【0066】比較のために、酸化テルビウム(Tb₂O₃)等の粉末を使用し、LPE法によって、同様に、SGGG基板[化学式(GdCa)₃(GaMgZr)₅O₁₂]上に、Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe₅O₁₂なる組成のTbBi系ガーネット単結晶厚膜を、厚さ約700 μ m育成した。

【0067】次に、これらのガーネット単結晶厚膜から基板を除去し、両面を鏡面研磨し、厚さ約600 μ mとした。図1は、LPE法によって育成したこれらGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜およびTbBi系ガーネット単結晶厚膜の透過率の波長依存性を示す図である。図1から明らかなように、約1.2～2.2 μ mの波長範囲で、GdYbBi系ガーネット単結晶厚膜は、高い透過率をもっている。

【0068】他方、TbBi系ガーネット単結晶厚膜が高い透過率を示す波長範囲は、約1.2～1.5 μ mにすぎない。この結果から、1.5 μ m以上の波長帯域においては、GdYbBi系ガーネット単結晶厚膜が有用である。

【0069】(実施例2)実施例1と同様の方法で、NGG基板上に、Gd_{2.2-x}Yb_xBi_{0.8}Fe_{4.5}Al_{0.5}O₁₂の化学式で、x=0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5のGdYbBi系ガーネット厚膜を、厚さ約700～900 μ m育成した。

【0070】実施例1と同様の方法で、基板を除去し、酸素濃度約40%の雰囲気中で、温度1050℃、20

時間保持する熱処理を行った。その後、波長 $1.62\mu\text{m}$ においてファラデー回転角が約45度となるように厚さを調整し、両面に SiO_2 反射防止膜をつけた。これらの GdYbBi 系ガーネット厚膜材料について、波長 $1.62\mu\text{m}$ における、6000eの印加磁界のもとでの挿入損失、ファラデー回転能、および室温付近における $\theta_{f/T}$ を求めた。また、振動型磁力計(VSM)を用いて、飽和磁化も測定した。なお、これらの GdYbBi 系ガーネット厚膜材料組成は、前記反射防止膜をつけるに先立つEPMA分析によって、予め確認した。

【0071】図2は、本実施例における GdYbBi 系ガーネット厚膜材料についての各測定結果を示す図である。図2(a)は飽和磁化の測定結果を、図2(b)は $\theta_{f/T}$ の値を示す図である。図2から、 $x=0.4$ 以下で飽和磁化は500G以下となる。また、 $\theta_{f/T}$ は、 $x=0\sim0.4$ の範囲で、いずれも $0.08\text{deg}/^\circ\text{C}$ 以下で、 x の増加に対して単調に減少することがわかる。

【0072】また、本実施例で対象とするすべての GdYbBi 系ガーネット厚膜材料について、挿入損失は $0.4\sim0.8\text{dB}$ 、ファラデー回転能は約 $700\sim800\text{deg}/\text{cm}$ であった。

【0073】これらの結果から、 $\text{Gd}_{2.2-x}\text{Yb}_x\text{Bi}_{0.8}\text{Fe}_{4.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{12}$ で示されるガーネット単結晶厚膜のうち、 $x=0\sim0.40$ の範囲の組成が有用であるといえることができる。

【0074】(実施例3) 実施例2と同様の方法で、NGG基板上に、 $\text{Gd}_{2.9-y}\text{Yb}_{0.1}\text{Bi}_{1.0}\text{Fe}_{5-z}\text{Al}_{1.0}\text{O}_{12}$ なる化学式で、 $y=0.5, 0.55, 0.6, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6$ の GdYbBi 系ガーネット単結晶厚膜を、厚さ約 $500\sim1200\mu\text{m}$ 育成した。

【0075】実施例2と同様に、これらの試料から基板を除去し、酸素濃度約40%の雰囲気中で、温度 1050°C 、20時間保持する熱処理を行った。その後、波長 $1.62\mu\text{m}$ においてファラデー回転角が約45度となるように厚さを調整し、両面に SiO_2 反射防止膜をつけた。これらの GdYbBi 系ガーネット厚膜材料について、波長 $1.62\mu\text{m}$ における、6000eの印加磁界のもとでの挿入損失、ファラデー回転能、および室温付近における $\theta_{f/T}$ を求めた。また、振動型磁力計(VSM)を用いて、飽和磁化も測定した。なお、これらの GdYbBi 系ガーネット厚膜材料組成は、前記反射防止膜をつけるに先立つEPMA分析によって、予め確認した。

【0076】図3は、本実施例における GdYbBi 系ガーネット厚膜材料についての各測定結果を示す図である。図3(a)はファラデー回転能の測定結果を、図3(b)は挿入損失値を、それぞれ示す図である。図3から、 $y=0.55$ 以上でファラデー回転能は $500\text{deg}/\text{cm}$ 以上となり、また $y=1.5$ を越えると、挿入

損失は急激に増加する。

【0077】また、本実施例で対象としたすべての GdYbBi 系ガーネット厚膜材料について、 $\theta_{f/T}$ は約 $0.06\sim0.075\text{deg}/^\circ\text{C}$ 、飽和磁化は約 $200\sim450\text{G}$ であった。これらの結果から、 $\text{Gd}_{2.9-y}\text{Yb}_{0.1}\text{Bi}_{1.0}\text{Fe}_{4.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_{12}$ で示されるガーネット単結晶厚膜のうち、 $y=0.55\sim1.50$ の範囲の組成が有用であるといえることができる。

【0078】(実施例4) 実施例2と同様の方法で、NGG基板上に、 $\text{Gd}_{1.9}\text{Yb}_{0.1}\text{Bi}_{1.0}\text{Fe}_{5-z}\text{Al}_{1.0}\text{O}_{12}$ なる化学式で、 $z=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ の GdYbBi 系ガーネット単結晶厚膜を、厚さ約 $700\sim1000\mu\text{m}$ 育成した。

【0079】基板の除去、酸素濃度約40%の雰囲気中で、温度 1050°C 、20時間保持する熱処理、および反射防止膜の形成等は、実施例2と同様の方法で行った。

【0080】そして前記と同様に、挿入損失、ファラデー回転能、 $\theta_{f/T}$ 、および飽和磁化を測定した。

【0081】図4は、本実施例における GdYbBi 系ガーネット厚膜材料についての各測定結果を示す図である。図4(a)は $\theta_{f/T}$ の測定結果を、また、図4(b)は飽和磁化を、それぞれ示す図である。

【0082】図4から、 $z=0.7$ を越えると、 $\theta_{f/T}$ は急激に増加する。また、 $z=0\sim0.7$ の範囲で飽和磁化は 500G 以下となっている。

【0083】また、本実施例で対象としたすべての GdYbBi 系ガーネット厚膜材料について、ファラデー回転能は約 $900\text{deg}/\text{cm}$ であり、挿入損失は $0.04\sim0.07\text{dB}$ であった。

【0084】これらの結果から、 $\text{Gd}_{1.9}\text{Yb}_{0.1}\text{Bi}_{1.0}\text{Fe}_{5-z}\text{Al}_{1.0}\text{O}_{12}$ で示されるガーネット単結晶厚膜のうち、 $z=0\sim0.7$ の範囲の組成が有用であるといえることができる。

【0085】(実施例5) 実施例2と同様の方法で、NGG基板上に、 $\text{Gd}_{1.7}\text{Yb}_{0.1}\text{Bi}_{1.2}\text{Fe}_{4.7}\text{Al}_{0.3}\text{O}_{12}$ で表される GdYbBi 系ガーネット単結晶厚膜を、厚さ約 $700\sim1000\mu\text{m}$ 育成した。

【0086】この GdYbBi 系ガーネット単結晶厚膜を、基板除去後に、酸素濃度が約50%以上の雰囲気中で、 950°C 、 1000°C 、 1050°C 、 1100°C 、 1130°C 、および 1150°C の各温度で、10時間の熱処理を行った。

【0087】その後、波長 $1.62\mu\text{m}$ においてファラデー回転角が約45度となるように厚さを調整し、両面に SiO_2 反射防止膜をつけた。そして、実施例2と同様に、挿入損失、 θ_f 、 $\theta_{f/T}$ 、および飽和磁化 $4\pi\text{Ms}$ を測定した。

【0088】図5は、本実施例における GdYbBi 系

ガーネット厚膜材料についての挿入損失を示す図である。図5から、950～1130℃の温度範囲で熱処理を行うことによって、熱処理前（非処理）よりも挿入損失が低減していることがわかる。

【0089】また、本実施例で対象としたすべてのGdYbBi系ガーネット厚膜材料について、ファラデー回転率は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、飽和磁化は約400Gであった。

【0090】（実施例6）実施例2と同様の方法で、NGG基板上に、 $Gd_{1.7}Yb_{0.1}Bi_{1.2}Fe_{4.7}Al_{0.3}O_{12}$ で表されるGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜を、厚さ約700～1000μm育成した。

【0091】このGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜を、基板除去後に、酸素濃度が0、5、10、20、40、60、80、および100%の各雰囲気中、温度1050℃で10時間保持する熱処理を行った。

【0092】その後、波長1.62μmにおいてファラデー回転角が約45度となるように厚さを調整し、両面にSiO₂反射防止膜をつけた。そして、実施例2と同様に、挿入損失、 θ_F 、 θ_F/T 、および飽和磁化を測定した。

【0093】図6は、本実施例におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料の挿入損失を示す図である。図6から、酸素濃度5%以上の雰囲気中での熱処理によって、挿入損失は、熱処理前（非処理）よりも低減していることがわかる。

【0094】また、本実施例で対象としたすべてのGdYbBi系ガーネット厚膜材料について、ファラデー回転率は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、飽和磁化は約400Gであった。

【0095】これらの結果から、 $Gd_{1.7}Yb_{0.1}Bi_{1.2}Fe_{4.7}Al_{0.3}O_{12}$ なる化学式で表されるGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜には、酸素濃度5%以上の雰囲気中での熱処理が有用であるといえる。

【0096】さらに、前述した実施例1～実施例6で対象としたすべてのGdYbBi系ガーネット厚膜材料について、磁化反転温度 T_{comp} は、すべて-5℃以下であり、さらに詳しくは、ほとんどが-50℃以下であることを確認した。

【0097】（実施例7）高純度の酸化ガドリニウム（Gd₂O₃）、酸化イットリウム（Yb₂O₃）、酸化テルビウム（Tb₂O₃）、酸化第二鉄（ α -Fe₂O₃）、酸化アルミニウム（Al₂O₃）、酸化ビスマス（Bi₂O₃）、酸化鉛（PbO）および酸化ホウ素（B₂O₃）の粉末を原料として使用し、PbO-Bi₂O₃-B₂O₃系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板（格子定数12.509オングストローム）上に、主成分比が、 $Gd_{1.9}Yb_{0.1}Bi_{1.0}Fe_{4.8}Al_{0.2}O_{12}$ で、PbOを約1.0wt%含有する組成のGdBi系ガーネット膜を厚さ約700μm育成した。

【0098】また、同様にして、SGGG基板（格子定数12.496オングストローム）上に、主成分比が、 $Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe_{5}O_{12}$ なる組成のTbBi系ガーネット膜を厚さ約700μmに育成した。

【0099】次に、これらの試料の基板を除去し、約600μmの厚さに鏡面研磨した後、波長可変型分光計を用いて、波長が0.9～2.2μmの範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。その結果を図7に示す。なお、これらの試料の両面について、各5点ずつE PMA分析を行い、その平均値として求めたものが、上記組成値である。

【0100】図7に示したガーネット厚膜の波長と透過率との関係において、実線はGdYbBi系ガーネット、破線はTbBi系ガーネットについて各厚膜の透過率と波長の関係を示す。GdYbBi系ガーネットにおいては、波長約1.2μm以上の領域で高い透過性を示している。一方、TbBi系ガーネット厚膜においては、高い透過性を示す波長帯域は、約1.2～1.5μmの範囲である。従って、1.5μm以上の波長帯域においては、GdYbBi系ガーネットが特に有用となる。

【0101】なお、該GdYbBi系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.62μmにおけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整した後、SiO₂による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約500Oeまで印加し、波長1.62μmにおける挿入損失I.L.、ファラデー回転率 θ_F 、飽和磁界 H_s を求めた。

【0102】また、同様にして、温度を変化し、ファラデー回転角の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度 T_{comp} を求めた。その結果、I.L.は0.09dB、 H_s は約400Oe、 θ_F は約900deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。従って、該GdYbBi系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子として、極めて有用であるといえる。

【0103】（実施例8）実施例7と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{1.75}Yb_{0.05}Bi_{1.2}Fe_{4.7}Al_{0.3}O_{12}$ で、PbOを0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0wt%含有する組成のGdYbBi系ガーネット膜を厚さ約700μm育成した後、試料を作製し、測定した。

【0104】その結果、全ての試料について、 H_s は約300Oe、 θ_F は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.06～0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0105】また、I.L.とPbOの含有量との関係を図8に示す。図8から、PbOの含有により、I.L.は減少し、PbOが4.0wt%を越える領域で、I.L.は著しく増加していることがわかる。従って、PbOの含有量は、0～4.0wt%（但し、0を含まず）の範囲が有用といえる。

【0106】(実施例9)第8の実施の形態と同様にして、主成分比が、 $Gd_{2.1}Yb_{0.1}Bi_{0.8}Fe_{4.9}Al_{0.1}O_{12}$ で、 PbO を1.3wt%含有するガーネット膜を厚さ約900 μm 育成した。

【0107】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で10時間保持し、熱処理した。

【0108】次に、これらの試料を、波長1.62 μm におけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整(約650 μm)した後、第1の実施の形態と同様にして、各特性を測定した。

【0109】その結果、全ての試料について、 H_s は約3500e、 θ_F は約700deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0110】又、I.L.と熱処理温度との結果を図9に示す。図9から、熱処理温度が950~1130℃の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、950~1130℃の温度範囲での熱処理が有用といえる。

【0111】(実施例10)実施例9と同様にして、主成分比が、 $Gd_{1.3}Yb_{0.2}Bi_{1.5}Fe_{4.4}Al_{0.6}O_{12}$ で、 PbO を約0.7wt%含有するガーネット膜を厚さ約600 μm 育成した。

【0112】次に、この試料を、1050℃の温度で、雰囲気中の酸素濃度を、0、10、20、40、60、80、100%とし、20時間保持して熱処理した後、試料を作製し、測定した。

【0113】その結果、全ての試料について、 H_s は約4500e、 θ_F は約1300deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0114】また、I.L.と雰囲気中の酸素濃度との結果を図10に示す。図10から、雰囲気中の酸素濃度が10~100%の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、10~100%の熱処理雰囲気中の酸素濃度が有用といえる。

【0115】(実施例11)高純度の酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)、酸化イッテルビウム(Yb_2O_3)、酸化テルビウム(Tb_2O_3)、酸化第二鉄($\alpha-Fe_2O_3$)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、酸化ビスマス(Bi_2O_3)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B_2O_3)の粉末を原料として使用し、 $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$ 系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、主成分比が、 $Gd_{1.9}Yb_{0.1}Bi_{1.0}Fe_{4.8}Al_{0.2}O_{12}$ で、 B_2O_3 を約1.0wt%含有する組成のGdBi系ガーネット膜を厚さ約700 μm 育成した。

【0116】また、同様にして、SGGG基板(格子定数12.496オングストローム)上に、主成分比が、 $Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe_{5.0}O_{12}$ 組成のTbBi系ガー

ネット膜を厚さ約700 μm に育成した。

【0117】次に、これらの試料の基板を除去し、約600 μm の厚さに鏡面研磨した後、波長可変型分光計を用いて、波長が0.9~2.2 μm の範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。その結果を図11に示す。なお、これらの試料の両面について、各5点ずつEPMMA分析を行い、その平均値として求めたものが、上記組成値である。なお、 B_2O_3 は、原子吸光分析法にて求めた。

10 【0118】図11に示したガーネット厚膜の波長と透過率との関係において、実線はGdYbBi系ガーネット、破線はTbBi系ガーネットについての各厚膜の透過率と波長の関係を示す。GdYbBi系ガーネットにおいては、波長約1.2 μm 以上の領域で高い透過性を示している。一方、TbBi系ガーネット厚膜においては、高い透過性を示す波長帯域は、約1.2~1.5 μm の範囲である。従って、1.5 μm 以上の波長帯域においては、GdYbBi系ガーネットが特に有用となる。

20 【0119】なお、該GdYbBi系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.62 μm におけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整した後、 SiO_2 による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約5000eまで印加し、波長1.62 μm における挿入損失I.L.、ファラデー回転角 θ_F 、飽和磁界 H_s を求めた。

【0120】また、同様にして、温度を変化し、ファラデー回転の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度 T_{comp} を求めた。その結果、I.L.は0.08dB、 H_s は約4000e、 θ_F は約900deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。従って、該GdYbBi系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子として、極めて有用であるといえる。

【0121】(実施例12)第11の実施の形態と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{1.75}Yb_{0.05}Bi_{1.2}Fe_{4.6}Al_{0.4}O_{12}$ で、 B_2O_3 を0、1、0、2、0、3、0、4.0wt%含有する組成のGdYbBi系ガーネット膜を厚さ約700 μm 育成した後、試料を作製し、測定した。

40 【0122】その結果、全ての試料について、 H_s は約3000e、 θ_F は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0123】また、I.L.と B_2O_3 含有量との関係を図12に示す。図12から、 B_2O_3 の含有により、I.L.は減少し、 B_2O_3 が3.5wt%を越える領域で、I.L.は著しく増加していることがわかる。従って、 B_2O_3 の含有量は、0~3.5wt%(但し、0を含まず)の範囲が有用といえる。さらに、望ましくは、 B_2O_3 が0.4~3.5wt%の範囲とすることにより、I.L.を0.1dB以下とすることができる。

50 【0124】(実施例13)第12の実施の形態と同様

にして、主成分比が、 $Gd_{2.1}Yb_{0.1}Bi_{0.8}Fe_{4.9}Al_{0.1}O_{12}$ で、 B_2O_3 を約0.5wt%含有するガーネット膜を厚さ約900 μm 育成した。

【0125】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で10時間保持し、熱処理した。

【0126】次に、これらの試料を、波長1.62 μm におけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整(約650 μm)した後、第1の実施の形態と同様にして、各特性を測定した。

【0127】その結果、全ての試料について、 H_s は約3500e、 θ_F は約700deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0128】また、I.L.と熱処理温度との結果を図13に示す。図13から、熱処理温度が950~1130℃の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、950~1130℃の温度範囲での熱処理が有用といえる。

【0129】(実施例14) 実施例13と同様にして、主成分比が、 $Gd_{1.3}Yb_{0.3}Bi_{1.5}Fe_{4.4}Al_{0.6}O_{12}$ で、 B_2O_3 を約3.5wt%含有するガーネット膜を厚さ約600 μm 育成した。

【0130】次に、この試料を、1050℃の温度で、雰囲気酸素濃度を、0、10、20、40、60、80、100%とし、20時間保持して熱処理した後、試料を作製し、測定した。

【0131】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約1300deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0132】また、I.L.と雰囲気酸素濃度との結果を図14に示す。図14から、雰囲気酸素濃度が10~100%の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、10~100%の熱処理雰囲気酸素濃度が有用といえる。

【0133】(実施例15) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)、酸化イッテルビウム(Yb_2O_3)、酸化第二鉄($\alpha-Fe_2O_3$)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、酸化ビスマス(Bi_2O_3)、酸化鉛(PbO)及び酸化ホウ素(B_2O_3)の粉末を使用した。これらの粉末を使って、 $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$ 系をフラックスとするLPE法によって、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、 $Gd_{1.75}Yb_{0.05}Bi_{1.2}Fe_{4.6}Al_{0.4}O_{12}$ なる主成分組成で、 PtO_2 を約1.0wt%含有するGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜を、厚さ約700 μm に育成した。

【0134】比較のために、酸化テルビウム(Tb_2O_3)等の粉末を使用し、LPE法によって、同様に、SGGG基板(格子定数12.496オングストローム)上に、 $Tb_2BiFe_5O_{12}$ なる組成のTbBi系ガ

ーネット単結晶厚膜を、厚さ約700 μm に育成した。

【0135】次に、これらのガーネット単結晶厚膜から基板を除去し、両面を鏡面研磨し、厚さ約600 μm とした。その後、波長可変型分光計を用いて、波長が0.9~2.2 μm の範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。なお、上記の組成値は、これらの試料の両面について各5点ずつEPMA分析を行い、その平均値として求めたものである。

【0136】図15に、LPE法によって育成したこれらのGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜及びTbBi系ガーネット単結晶厚膜の透過率の波長依存性を示す。図15において、実線は、GdYbBi系ガーネット、破線は、TbBi系ガーネットである。

【0137】図15から明らかなように、GdYbBi系ガーネット単結晶厚膜は、約1.2 μm 以上の領域で、高い透過率をもっている。他方、TbBi系ガーネット単結晶厚膜が高い透過率を示す波長範囲は、約1.2~1.5 μm にすぎない。この結果から、1.5 μm 以上の波長帯域においては、GdYbBi系ガーネット単結晶厚膜が有用であることがわかる。

【0138】なお、このGdYbBi系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.62 μm におけるファラデー回転が約45degとなる厚さに調整した後、 SiO_2 による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約5000eまで印加し、波長1.62 μm におけるI.L.、 θ_F 、 H_s を求めた。また、同様にして、温度を変化し、 θ_F/T 、 T_{comp} を求めた。I.L.は、0.08dB、 H_s は、約3000e、 θ_F は、約1100deg/cm、 θ_F/T は、約0.07deg/℃、 T_{comp} は、-40℃以下であった。したがって、本発明のGdYbBi系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子としてきわめて有用であることがわかる。

【0139】(実施例16) 実施例15と同様の方法で、NGG基板上に、主成分比が $Gd_{1.9}Yb_{0.1}Bi_{1.0}Fe_{4.8}Al_{0.2}O_{12}$ で、 PtO_2 を0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0wt%含有するGdYbBi系ガーネット厚膜を、厚さ約800 μm に育成した後、試料を作製し、各特性を測定した。

【0140】図16に、本実施例におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料についてのI.L.の測定結果を示す。図16から、 PtO_2 の含有により、I.L.は、減少し、 PtO_2 が3.5wt%を越える領域で、I.L.は、著しく増加している。

【0141】また、本実施例で対象としたすべてのGdBi系ガーネット厚膜材料について、 H_s は、約4000e、 θ_F は、約900deg/cm、 θ_F/T は、約0.06deg/℃、 T_{comp} は、-40℃以下であった。したがって、 PtO_2 含有量は、0~3.5wt%(0を含まず)の範囲が有用である。更に、望ましくは、 PtO_2 が0.4~3wt%の範囲でI.L.が0.1dBとな

り、有用である。

【0142】(実施例17) 実施例16と同様の方法で、NGG基板上に、主成分比が $Gd_{2.1}Yb_{0.1}Bi_{0.8}Fe_{4.9}Al_{0.1}O_{12}$ で、 PtO_2 を約0.5wt%含有するGdB i系ガーネット厚膜を、厚さ約900 μm に育成した。

【0143】このGdB i系ガーネット単結晶厚膜を、酸素濃度が約50%の雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で、10時間保持し、熱処理した。

【0144】その後、これらの試料を波長1.62 μm において θ_F が約45度となるように厚さを調整(約650 μm)した後、実施例1と同様に、各特性を測定した。

【0145】図17に、本実施例におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料についてのI. L.を示す。図17から、950~1130℃の温度範囲で熱処理を行うことによって、熱処理前(非処理)よりもI. L.が低減していることがわかる。

【0146】また、本実施例で対象としたすべてのGdYbBi系ガーネット厚膜材料について、 H_s は、約3500e、 θ_F は、約700deg/cm、 θ_F/T は、約0.06deg/℃、 $T_{comp.}$ は、-40℃以下であった。したがって、950~1130℃の温度範囲での熱処理が有用であることがわかる。

【0147】(実施例18) 実施例17と同様の方法で、NGG基板上に、主成分比が $Gd_{1.2}Yb_{0.3}Bi_{1.5}Fe_{4.4}Al_{0.6}O_{12}$ で、 PtO_2 を約3.5wt%含有するGdYbBi系ガーネット厚膜を、厚さ約600 μm に育成した。

【0148】このGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜を、1050℃の温度で、0、10、20、40、60、80、100%の雰囲気酸素濃度で、20時間保持し、熱処理した後、試料を作製し、各特性を測定した。

【0149】図18に、本実施例におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料についてのI. L.を示す。図18から、10~100%の範囲の雰囲気酸素濃度で熱処理を行うことによって、熱処理前(非処理)よりもI. L.が低減していることがわかる。

【0150】また、本実施例で対象としたすべてのGdYbBi系ガーネット厚膜材料について、 H_s は、約4500e、 θ_F は、約1300deg/cm、 θ_F/T は、約0.07deg/℃、 $T_{comp.}$ は、-40℃以下であった。したがって、10~100℃の雰囲気酸素濃度での熱処理が有用であることがわかる。

【0151】(実施例19) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)、酸化イッテルビウム(Yb_2O_3)、酸化テルビウム(Tb_2O_3)、酸化第二鉄($\alpha-Fe_2O_3$)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、酸化ビスマス

(Bi_2O_3)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B_2O_3)の粉末を原料として使用し、 $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$ 系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、主成分比が、 $Gd_{1.4}Yb_{0.2}Bi_{1.4}Fe_{4.3}Al_{0.7}O_{12}$ なる組成のGdB i系ガーネット膜を厚さ約700 μm 育成した。

【0152】また、同様にして、SGG基板(格子定数12.496オングストローム)上に、主成分比が、 $Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe_5O_{12}$ からなる組成のTbBi系ガーネット膜を厚さ約700 μm に育成した。

【0153】次に、これらの試料の基板を除去し、約600 μm の厚さに鏡面研磨した後、波長可変型分光計を用いて、波長が0.9~2.2 μm の範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。その結果を図1に示す。なお、これらの試料の両面について、各5点ずつEPM分析を行い、その平均値として求めたものが、上記組成値である。

【0154】図19に、ガーネット厚膜の波長と透過率との関係を示す。尚、図中、実線はGdB i系ガーネット、破線はTbBi系ガーネットについての各厚膜の透過率と波長の関係を示す。

【0155】図19において、GdB i系ガーネットにおいては、波長約1.2 μm 以上の領域で高い透過性を示している。一方、TbBi系ガーネット厚膜においては、高い透過性を示す波長帯域は、約1.2~1.5 μm の範囲である。従って、1.5 μm 以上の波長帯域においては、GdB i系ガーネットが特に有用となる。

【0156】なお、該GdB i系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.55 μm におけるファラデー回転が約45degとなる厚さに調整した後、 SiO_2 による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約5000eまで印加し、波長1.55 μm における挿入損失(I. L.)、ファラデー回転 θ_F 、飽和磁界 H_s を求めた。

【0157】また、同様にして、温度を変化し、ファラデー回転角の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度 T_{comp} を求めた。

【0158】その結果、I. L.は0.10dB、 H_s は約4000e、 θ_F は約1300deg/cm、 θ_F/T は約0.04deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0159】従って、該GdB i系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子として、極めて有用であるといえる。

【0160】(実施例20) 実施例19と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{1.6-x}Yb_xBi_{1.4}Fe_{4.1}Al_{0.9}O_{12}$ で、 $x=0, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50$ なる組成のGdB i系ガーネット膜を厚さ約700 μm に育成した後、試料を作製し、測定した。

21

【0161】その結果、全ての試料について、 θ_F は約1300deg/cm、 θ_F/T は約0.02~0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0162】また、組成値 x と θ_F/T と H_s との関係を図20に示す。

【0163】図20から、 x の増加により、 $I.L.$ は減少する傾向を示すことがわかる。また、 H_s は x の増加により増大し、 x が0.45以上で500Oeを越す値となる。

【0164】従って、 x の組成値は、 $0 < x \leq 0.45$ 10の範囲が有用といえる。

【0165】(実施例21) 第20の実施の形態と同様にして、NGG基板上に主成分比が、 $Gd_{2.8-y}Yb_{0.2}Bi_yFe_{4.2}Al_{0.8}O_{12}$ で、 $y=0.80, 0.90, 1.00, 1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60$ なる組成のGdBiガーネット膜を厚さ約600μm育成した後、試料を作製し、測定した。

【0166】その結果、全ての試料について、 H_s は約200~450Oe、 θ_F/T は約0.02~0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0167】また、組成値 y と θ_F 、 $I.L.$ との関係を図21に示す。

【0168】図21から、 θ_F が800deg/cmを越えるのは、 y が0.85以上で得られている。又、 $I.L.$ は、 y が1.55を越えると著しく増加する傾向を示す。

【0169】従って、 y の組成値は、 $0.85 \leq y \leq 1.55$ の範囲が有用といえる。尚、 y が1.55を越える領域で $I.L.$ が増大するのは、ガーネット結晶の結晶格子の歪み、イオンバランスのばらつきに起因していると 30推定される。

【0170】(実施例22) 実施例20と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{1.4}Yb_{0.3}Bi_{1.3}Fe_{5-z}Al_zO_{12}$ で、 $z=0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00$ なる組成のGdBiガーネット膜を厚さ約800μmに育成した後、試料を作製し、測定した。

【0171】その結果、全ての試料について、 θ_F は約1200deg/cm、 θ_F/T は約0.04~0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0172】また、組成値 z と H_s 、 $I.L.$ との関係を図22に示す。

【0173】図22から、 H_s が500Oe以下は、 z が0.25以上で得られている。また、 $I.L.$ は z が0.95以上で急激に増加していることがわかる。

【0174】従って、 z の組成値は、 $0.25 \leq z \leq 0.95$ の範囲が有用といえる。なお、 z が0.95以上の領域で、 $I.L.$ が増大するのは、ガーネット結晶の結晶格子の歪み、イオンバランスのばらつきに起因していると推定される。

22

【0175】(実施例23) 実施例20と同様にして、主成分比が、 $Gd_{2.0}Yb_{0.1}Bi_{0.9}Fe_{4.5}Al_{0.5}O_{12}$ なる組成のガーネット膜を厚さ約700μmに育成した。

【0176】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で、10時間保持する熱処理を施した。

【0177】次に、これらの試料を、波長1.55μmにおけるファラデー回転角が、約45degとなる厚さに調整(約550μm)した後、第1の実施の形態と同様にして、各特性を測定した。

【0178】その結果、全ての試料について、 H_s は約400Oe、 θ_F は約850deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0179】また、 $I.L.$ と熱処理温度との結果を図23に示す。

【0180】図23から、熱処理温度が950~1140℃の範囲で、熱処理による $I.L.$ の低減効果が認めら 20れる。

【0181】従って、950~1140℃の温度範囲での熱処理が有用といえる。

【0182】(実施例24) 実施例20と同様にして、主成分比が、 $Gd_{1.6}Yb_{0.2}Bi_{1.2}Fe_{4.3}Al_{0.7}O_{12}$ なる組成のガーネット膜を厚さ約600μmに育成した。

【0183】次に、この試料を、1050℃の各温度で、雰囲気酸素濃度を、0、10、20、40、60、80、100%とし、20時間保持する熱処理を施した後、試料を作製し、各特性を測定した。

【0184】その結果、全ての試料について、 H_s は約400Oe、 θ_F は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.04deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0185】また、 $I.L.$ と雰囲気酸素濃度との関係を図24に示す。

【0186】図24から、雰囲気酸素濃度が、10~100%の範囲で、熱処理による $I.L.$ の低減効果が認められる。

【0187】従って、10~100%の範囲の熱処理雰囲気の酸素濃度が有用といえる。

【0188】(実施例25) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)、酸化イッテルビウム(Yb_2O_3)、酸化第二鉄(Fe_2O_3)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、酸化ビスマス(Bi_2O_3)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B_2O_3)の粉末を原料として使用し、 $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$ 系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、 PbO を約0.5wt%含有した、主成分比が、 $Gd_{1.4}Yb_{0.3}Bi_{1.3}Fe_{4.4}Al_{0.6}O_{12}$ で、 B_2O_3 を0、1、2、3、4、5wt%含有する組成のG

dBi系ガーネット膜を厚さ約500 μ m育成した。

【0189】次に、これらの試料の基板を除去し、両面を研磨し、波長1.55 μ mにおけるファラデー回転が、約45degとなる厚さに調整した。なお、上述した組成は、これらの試料の両面について、5点ずつEPMA分析を行い、その平均値として求めたものであり、B₂O₃については、試料片を原子吸光分析法により求めたものである。

【0190】次に、これらの試料板にSiO₂膜による無反射被覆処理を行った後、電磁石を用いて磁界を約0.5kOeまで印加していき、波長1.55 μ mにおいて、透過率が飽和に達する最小の印加磁界（飽和磁界H_s）と挿入損失（I.L.）、及びファラデー回転能 θ_F 、及び-20℃～+80℃の間における θ_F 温度変化率 θ_F/T を求めた。

【0191】その結果、全ての試料について、H_s約400Oe、 θ_F 約1200deg/cm、 θ_F/T 約0.06deg/℃、T_{comp}-40℃以下であった。

【0192】また、I.L.とB₂O₃含有量との関係を図25に示す。

【0193】図25からわかるように、I.L.は、B₂O₃の含有により減少し、4.0wt%を越える領域で著しく増加することがわかる。このことにより、I.L.の低減効果は、0～4.0wt%（但し、0を含まず）の範囲で認められる。従って、B₂O₃の含有量は、0～4.0wt%（但し、0を含まず）の範囲が有用となる。特に、1～3.2wt%の範囲が好ましい。

【0194】（実施例26）実施例25と同様にして、B₂O₃を約0.5wt%含有した、主成分比が、Gd_{1.7}Yb_{0.2}Bi_{1.1}Fe_{4.6}Al_{0.4}O₁₂で、PbOを0.1, 2, 3, 4, 5wt%含有する組成のGdB系ガーネット膜を厚さ約600 μ m育成した後、試料を作製し、測定した。

【0195】その結果、全ての試料について、H_sは約400Oe、 θ_F は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、T_{comp}は-40℃以下であった。

【0196】また、I.L.とPbO含有量との関係を図26に示す。

【0197】図26から、PbOの含有により、I.L.は減少し、PbOが4.0wt%を越える領域で、I.L.は著しく増加していることがわかる。従って、PbOの含有量は、0～4.0wt%（0を含まず）の範囲が有用といえる。さらに、望ましくは、PbOが0.4～4.0wt%の範囲とすることにより、I.L.を0.08dB以下とすることができる。なお、特に、1.0～4.0wt%の範囲が好ましい。

【0198】（実施例27）実施例25と同様にして、主成分比が、Gd_{1.1}Yb_{0.4}Bi_{1.5}Fe_{4.1}Al_{0.9}O₁₂で、B₂O₃を約0.7wt%含有するガーネット膜を厚さ約500 μ m育成した。

【0199】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で10時間保持し、熱処理した。

【0200】次に、これらの試料の両面について研磨し、波長1.55 μ mにおけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整した後、測定した。

【0201】その結果、全ての試料について、H_sは約300Oe、 θ_F は約1400deg/cm、 θ_F/T は約0.05deg/℃、T_{comp}は-40℃以下であった。

【0202】また、I.L.と熱処理温度との結果を図27に示す。

【0203】図27から、熱処理温度が950～1140℃の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、950～1140℃の温度範囲での熱処理が有用といえる。

【0204】（実施例28）実施例25と同様にして、主成分比が、Gd_{2.0}Yb_{0.1}Bi_{0.9}Al_{0.2}O₁₂で、B₂O₃を約1.5wt%、PbOを約1.5wt%含有するガーネット膜を厚さ約700 μ mに育成した。

【0205】次に、この試料を、1050℃の温度で、雰囲気酸素濃度を、0, 10, 20, 40, 60, 80, 100%とし、20時間保持して熱処理した後、試料を作製し、測定した。

【0206】その結果、全ての試料について、H_sは約500Oe、 θ_F は約900deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、T_{comp}は-40℃以下であった。

【0207】また、I.L.と熱処理温度との関係を図28に示す。

【0208】図28から、熱処理雰囲気酸素濃度が10～100%の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、10～100%の熱処理雰囲気酸素濃度が有用といえる。

【0209】（実施例29）高純度の酸化ガドリニウム（Gd₂O₃）、酸化イッテルビウム（Yb₂O₃）、酸化テルビウム（Tb₂O₃）、酸化第二鉄（ α -Fe₂O₃）、酸化アルミニウム（Al₂O₃）、酸化ビスマス（Bi₂O₃）、酸化鉛（PbO）、酸化ホウ素（B₂O₃）及び酸化白金（PtO₂）の粉末を原料として使用し、PbO-Bi₂O₃-B₂O₃系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板（格子定数12.509オングストローム）上に、主成分比が、Gd_{1.4}Yb_{0.3}Bi_{1.3}Fe_{4.4}Al_{0.6}O₁₂でBi₂O₃を約1.5wt%、PbOを約2.0wt%、PtO₂を約2.0wt%、含有する組成のGdB系ガーネット膜を厚さ約700 μ m育成した。

【0210】また、同様にして、SGGG基板（格子定数12.496オングストローム）上に、主成分比が、Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe_{5.0}O₁₂からなる組成のTbBi系ガーネット膜を厚さ約700 μ mに育成した。

【0211】次に、これらの試料の基板を除去し、約600 μ mの厚さに鏡面研磨した後、波長可変型分光計を用いて、波長が0.9~2.2 μ mの範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。その結果を図29に示す。なお、これらの試料の両面について、各5点ずつEPMA分析を行い、その平均値として求めたものが、上記組成値である。なお、B₂O₃は原子吸光分析法によって求めたものである。

【0212】図29に、ガーネット厚膜の波長と透過率との関係を示す。尚、図中、実線はGdB i系ガーネット、破線はTbB i系ガーネットについての各厚膜の透過率と波長の関係を示す。

【0213】図29において、GdB i系ガーネットにおいては、波長約1.2 μ m以上の領域で高い透過性を示している。一方、TbB i系ガーネット厚膜においては、高い透過性を示す波長帯域は、約1.2~1.5 μ mの範囲である。従って、1.5 μ m以上の波長帯域においては、GdB i系ガーネットが特に有用となる。

【0214】なお、該GdB i系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.55 μ mにおけるファラデー回転が約45degとなる厚さに調整した後、SiO₂による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約5000eまで印加し、波長1.55 μ mにおける挿入損失(I.L.)、ファラデー回転能 θ_F 、飽和磁界H_sを求めた。

【0215】また、同様にして、温度を変化し、ファラデー回転角の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度T_{comp}を求めた。

【0216】その結果、I.L.は0.07dB、H_sは約4000e、 θ_F は約1200deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、T_{comp}は-40℃以下であった。

【0217】従って、該GdB i系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子として、極めて有用であるといえる。

【0218】(実施例30) 実施例29と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{1.7}Yb_{0.2}Bi_{1.1}Fe_{4.6}Al_{0.4}O₁₂で、B₂O₃を約0.5wt%、PbOを約0.5wt%としPtO₂を0、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50含有した組成のGdB i系ガーネット厚膜を厚さ約600 μ mに育成した後、試料を作製し、測定した。

【0219】その結果、全ての試料について、H_sは約4000e、 θ_F は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、T_{comp}は-40℃以下であった。

【0220】また、I.L.とPtO₂との関係を図30に示す。

【0221】図30から、PtO₂の増加により、I.L.は減少する傾向を示し、PtO₂が4.0wt%を越える領域でI.L.が著しく増加している。

【0222】従って、PtO₂の組成値は、0<PtO₂

≤0.40wt%の範囲が有用といえる。なお、特に、0.4~3.6wt%の範囲が好ましい。

【0223】(実施例31) 実施例29と同様にして、NGG基板上に主成分比が、Gd_{2.0}Yb_{0.1}Bi_{0.9}Fe_{4.8}Al_{0.2}O₁₂で、PbOを約3.5wt%、PtO₂を約0.5wt%含有するGdB i系ガーネット厚膜を厚さ約600 μ m育成した後、この試料を約50%の酸素濃度雰囲気中で950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で10時間保持する熱処理をした。

【0224】次に、これらの試料の両面を研磨し、波長1.55 μ mにおけるファラデー回転が約45degとなる厚さにした後、試料を作製し、測定した。

【0225】その結果、全ての試料について、H_sは約5000e、 θ_F は約900deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、T_{comp}は-40℃以下であった。

【0226】また、I.L.と熱処理温度との関係を図31に示す。

【0227】図31から、熱処理温度が950~1140℃の範囲で熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0228】従って、950~1140℃の範囲での熱処理が有用といえる。

【0229】(実施例32) 実施例29と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{1.1}Yb_{0.4}Bi_{1.5}Fe_{4.1}Al_{0.9}O₁₂で、B₂O₃を約3.5wt%、PtO₂を約3.5wt%含有するGdB i系ガーネット厚膜を厚さ約500 μ mに育成した。

【0230】次に、この試料を1050℃の温度で、雰囲気酸素濃度を0、10、20、40、60、80、100%とし、20時間保持する熱処理をした後、試料を作製し、測定した。

【0231】その結果、全ての試料について、H_sは約3000e、 θ_F は約1400deg/cm、 θ_F/T は約0.05deg/℃、T_{comp}は-40℃以下であった。

【0232】また、I.L.と熱処理温度との関係を図32に示す。

【0233】図32から、熱処理雰囲気酸素濃度が10~100%の範囲で熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0234】従って、10~100%の範囲の熱処理雰囲気酸素濃度が有用といえる。

【0235】(実施例33) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd₂O₃)、酸化イッテルビウム(Yb₂O₃)、酸化テルビウム(Tb₂O₃)、酸化第二鉄(α -Fe₂O₃)、酸化ガリウム(Ga₂O₃)、酸化ビスマス(Bi₂O₃)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B₂O₃)の粉末を原料として使用し、PbO-Bi₂O₃-B₂O₃系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、主

成分比が、 $Gd_{1.9}Yb_{0.2}Bi_{0.9}Fe_{4.6}Ga_{0.4}O_{12}$ なる組成のGdB i系ガーネット膜を厚さ約800 μm 育成した。

【0236】また、同様にして、SGGG基板(格子定数12.496オングストローム)上に、主成分比が、 $Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe_{5}O_{12}$ からなる組成のTbB i系ガーネット膜を厚さ約700 μm に育成した。

【0237】次に、これらの試料の基板を除去し、約600 μm の厚さに鏡面研磨した後、波長可変型分光計を用いて、波長が0.9~2.2 μm の範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。その結果を図1に示す。なお、これらの試料の両面について、各5点ずつE PMA分析を行い、その平均値として求めたものが、上記組成値である。

【0238】図33に、ガーネット厚膜の波長と透過率との関係を示す。尚、図中、実線はGdB i系ガーネット、破線はTbB i系ガーネットについての各厚膜の透過率と波長の関係を示す。

【0239】図33において、GdB i系ガーネットにおいては、波長約1.2 μm 以上の領域で高い透過性を示している。一方、TbB i系ガーネット厚膜においては、高い透過性を示す波長帯域は、約1.2~1.5 μm の範囲である。従って、1.5 μm 以上の波長帯域においては、GdB i系ガーネットが特に有用となる。

【0240】なお、該GdB i系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.62 μm におけるファラデー回転が約45degとなる厚さに調整した後、 SiO_2 による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約5000eまで印加し、波長1.62 μm における挿入損失(I.L.)、ファラデー回転 θ_F 、飽和磁界 H_s を求めた。

【0241】また、同様にして、温度を変化し、ファラデー回転角の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度 T_{comp} を求めた。

【0242】その結果、I.L.は0.08dB、 H_s は約4000e、 θ_F は約750deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0243】従って、該GdB i系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子として、極めて有用であるといえる。

【0244】(実施例34)第33の実施の形態と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{2.2-x}Yb_{x}Bi_{0.8}Fe_{4.5}Ga_{0.5}O_{12}$ で、 $x=0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50$ なる組成のGdB i系ガーネット膜を厚さ約800 μm に育成した後、試料を作製し、測定した。

【0245】その結果、全ての試料について、 θ_F は約700deg/cm、 θ_F/T は約0.07~0.08deg/℃、 T_{comp} は-10℃以下であった。

【0246】また、組成値 x と θ_F 、I.L.との関係を

図34に示す。

【0247】図34から、 x での置換により、I.L.は著しく減少し、 H_s は x が0.4以下で5000e以下となっていることがわかる。

【0248】従って、 x の組成値は、 $0 < x \leq 0.40$ の範囲が有用といえる。尚、 x が0.10以下の領域でI.L.が増大するのは、ガーネット結晶の結晶格子の歪み、イオンバランスのばらつきに起因していると推定される。

【0249】(実施例35)実施例34と同様にして、NGG基板上に主成分比が、 $Gd_{2.7-y}Yb_{0.3}Bi_{y}Fe_{4.4}Ga_{0.6}O_{12}$ で、 $y=0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, 1.10, 1.20$ なる組成のGdB i系ガーネット膜を厚さ約900 μm 育成した後、試料を作製し、測定した。

【0250】その結果、全ての試料について、 H_s は約5000e、 θ_F/T は約0.06~0.08deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0251】また、組成値 y と θ_F 、I.L.との関係を図35に示す。

【0252】図35から、 θ_F が600deg/cmを越えるのは、 y が0.55以上で得られている。また、I.L.は、 y が1.10を越えると著しく増加する傾向を示す。

【0253】従って、 y の組成値は、 $0.55 \leq y \leq 1.10$ の範囲が有用といえる。尚、 y が1.10以上の領域でI.L.が増大するのは、ガーネット結晶の結晶格子の歪み、イオンバランスのばらつきに起因していると推定される。

【0254】(実施例36)実施例34と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{1.8}Yb_{0.2}Bi_{1.0}Fe_{5-z}Ga_zO_{12}$ で、 $z=0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70$ なる組成のGdB i系ガーネット膜を厚さ約800 μm に育成した後、試料を作製し、測定した。

【0255】その結果、全ての試料について、I.L.は0.1dB以下、 θ_F は約800deg/cm、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0256】また、組成値 z と θ_F/T 、 H_s との関係を図36に示す。

【0257】図36から、 θ_F/T が0.08deg/℃以下は、 z が0.60以下で得られている。また、 H_s が5000e以下は、 z が0.15以上で得られている。

【0258】従って、 z の組成値は、 $0.20 \leq z \leq 0.60$ の範囲が有用といえる。

【0259】(実施例37)実施例34と同様にして、主成分比が、 $Gd_{2.2}Yb_{0.1}Bi_{0.7}Fe_{4.7}Ga_{0.3}O_{12}$ なる組成のガーネット膜を厚さ約900 μm に育成した。

【0260】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰

雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で、10時間保持する熱処理を施した。

【0261】次に、これらの試料を、波長1.62μmにおけるファラデー回転角が、約45degとなる厚さに調整(約650μm)した後、実施例33と同様にして、各特性を測定した。

【0262】その結果、全ての試料について、 H_s は約3000e、 θ_F は約650deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、 T_{comp} は-30℃以下であった。

【0263】また、I.L.と熱処理温度との結果を図37に示す。

【0264】図37から、熱処理温度が950~1130℃の範囲で、熱処理によるI.L.の低下が認められる。

【0265】従って、950~1130℃の温度範囲での熱処理が有用といえる。

【0266】(実施例38) 実施例35と同様にして、主成分比が、 $Gd_{1.5}Yb_{0.3}Bi_{1.1}Fe_{4.5}Ga_{0.5}O_{12}$ なる組成のガーネット膜を厚さ約600μmに育成した。

【0267】次に、この試料を、1050℃の各温度で、雰囲気酸素濃度を、0、10、20、40、60、80、100%とし、20時間保持する熱処理をした後、試料を作製し、各特性を測定した。

【0268】その結果、全ての試料について、 H_s は約4500e、 θ_F は約900deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0269】また、I.L.と雰囲気酸素濃度との関係を図38に示す。

【0270】図38から、雰囲気酸素濃度が、10~100%の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0271】従って、10~100%の範囲の熱処理雰囲気酸素濃度が有用といえる。

【0272】(実施例39) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)、酸化イッテルビウム(Yb_2O_3)、酸化第二鉄(Fe_2O_3)、酸化ガリウム(Ga_2O_3)、酸化ビスマス(Bi_2O_3)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B_2O_3)の粉末を原料として使用し、 $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$ 系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、主成分比が、 $Gd_{1.7}Yb_{0.3}Bi_{1.0}Fe_{4.5}Ga_{0.5}O_{12}$ で、 B_2O_3 を0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0wt%含有する組成のGdBi系ガーネット膜をそれぞれ厚さ約600μm育成した。

【0273】次に、これらの試料の基板を除去した後、両面を研磨し、波長1.58μmにおけるファラデー回転角が、約45degとなる厚さに調整した。なお、上述した組成は、これらの試料の両面について、5点ずつE

PMA分析を行い、その平均値として求めたものであり、 B_2O_3 については、試料片を原子吸光分析法により求めたものである。

【0274】次に、これらの試料板に SiO_2 膜による無反射被覆処理を行った後、電磁石を用いて磁界を約5000eまで印加していき、波長1.58μmにおける挿入損失(I.L.)、及びファラデー回転能 θ_F 、透過率が飽和に達する最小の印加磁界(飽和磁界 H_s)を求めた。

10 【0275】また、同様にして、温度を変化し、-20℃~+80℃の間におけるファラデー回転角 θ_F の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度 T_{comp} を求めた。

【0276】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約900deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/℃、 T_{comp} -40℃以下であった。

【0277】また、I.L.と B_2O_3 含有量との関係を図39に示す。

【0278】図39からわかるように、I.L.は、 B_2O_3 の含有により減少し、4.0wt%を越える領域で著しく増加することがわかる。このことにより、I.L.の低減効果は、0~4.0wt%(但し、0を含まず)の範囲で認められる。

【0279】従って、 B_2O_3 の含有量は、0~4.0wt%(但し、0を含まず)の範囲が有用となる。特に、1~3.2wt%の範囲が好ましい。

【0280】(実施例40) 実施例39と同様にして、NGG基板上に、主成分比が $Gd_{2.0}Yb_{0.2}Bi_{0.8}Fe_{4.7}Ga_{0.3}O_{12}$ で、 PbO を0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0wt%含有する組成のGdBi系ガーネット厚膜を厚さ約700μm育成した後、試料を作製し、測定した。

【0281】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約800deg/cm、 θ_F/T は約0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0282】また、I.L.と PbO 含有量との関係を図40に示す。

【0283】図40から、 PbO の含有により、I.L.は減少し、 PbO が4.0wt%を越える領域で、I.L.は著しく増加していることがわかる。

40 【0284】従って、 PbO の含有量は、0~4.0wt%(0を含まず)の範囲が有用といえる。さらに、望ましくは、 PbO が0.4~4.0wt%の範囲とすることにより、I.L.を0.08dB以下とすることができる。なお、特に、1.0~4.0wt%の範囲が好ましい。

【0285】(実施例41) 実施例40と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{1.5}Yb_{0.4}Bi_{1.1}Fe_{4.4}Ga_{0.6}O_{12}$ で、 PtO_2 を0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0wt%含有するGdBi系ガーネット厚膜を厚さ約600μm育成した後、試料を作製

し、測定した。

【0286】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約1000deg/cm、 θ_F/Γ は約0.06deg/℃、 T_{comp} -40℃以下であった。

【0287】また、I.L.とPtO₂含有量との関係を図41に示す。

【0288】図41から、PtO₂の含有により、I.L.は減少し、PtO₂が約4.0wt%を越える領域で、I.L.は著しく増加していることがわかる。

【0289】従って、PtO₂の含有量は、0~4.0wt% (0を含まず)の範囲が有用といえる。なお、特に、0.4~3.8wt%の範囲が好ましい。

【0290】(実施例42) 実施例40と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{1.9}Yb_{0.2}Bi_{0.9}Fe_{4.6}Ga_{0.4}O₁₂で、B₂O₃、PbO及びPtO₂を2種類以上含有し、その総量が0、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、9.0、10.0wt%含有するGdBi系ガーネット厚膜を厚さ約600μm育成した後、試料を作製し、測定した。

【0291】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約900deg/cm、 θ_F/Γ は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0292】また、I.L.とB₂O₃、PbO、PtO₂の含有量との関係を図42に示す。

【0293】図42から、B₂O₃、PbO、PtO₂の含有により、I.L.は減少し、含有量が約9.0wt%を越える領域で、I.L.は増加する傾向を示していることがわかる。

【0294】従って、B₂O₃、PbO、PtO₂の含有量は、0~9.0wt% (但し、0を含まず)の範囲でI.L.は明らかに低減し、有用であるといえる。

【0295】(実施例43) 実施例40と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{2.1}Yb_{0.1}Bi_{0.7}Fe_{4.8}Ga_{0.2}O₁₂で、B₂O₃を約1wt%、PbOを約2wt%、及びPtO₂を約2wt%含有するGdBi系ガーネット厚膜を厚さ約700μm育成した。

【0296】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で10時間保持し、熱処理した。

【0297】次に、これらの試料の両面について研磨し、波長1.58μmにおけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整した後、試料を作製し、測定した。

【0298】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約700deg/cm、 θ_F/Γ は約0.07deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0299】又、I.L.と熱処理温度との関係を図43に示す。

【0300】図43から、熱処理温度が950~114

0℃の範囲で熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0301】従って、950~1140℃の温度範囲での熱処理が有用であるといえる。

【0302】(実施例44) 実施例43と同様にして、主成分比が、Gd_{1.7}Yb_{0.2}Bi_{1.1}Ga_{0.6}O₁₂で、B₂O₃を約2.0wt%、PbOを約3.0wt%、PtO₂を約2wt%含有するGdBi系ガーネット膜を厚さ約600μmに育成した。

【0303】次に、この試料を、1050℃の温度で、雰囲気酸素濃度を、0、10、20、40、60、80、100%とし、10時間保持して熱処理した後、波長1.58μmにおけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整した後、試料を作製し、各特性を測定した。

【0304】その結果、全ての試料について、 H_s は約3000e、 θ_F は約1000deg/cm、 θ_F/Γ は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0305】また、I.L.と熱処理雰囲気酸素濃度との関係を図44に示す。

【0306】図44から、熱処理雰囲気酸素濃度が10~100%の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0307】従って、10~100%の熱処理雰囲気酸素濃度が有用である。

【0308】(実施例45) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd₂O₃)、酸化イッテリビウム(Yb₂O₃)、酸化テルビウム(Tb₂O₃)、酸化第二鉄(α-Fe₂O₃)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)、酸化ガリウム(Ga₂O₃)、酸化ビスマス(Bi₂O₃)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B₂O₃)の粉末を原料として使用し、PbO-Bi₂O₃-B₂O₃系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、主成分比が、Gd_{1.5}Yb_{0.1}Bi_{1.3}Fe_{4.4}Al_{0.6}Ga_{0.1}O₁₂なる組成のGdBi系ガーネット膜を厚さ約700μm育成した。

【0309】また、同様にして、SGGG基板(格子定数12.496オングストローム)上に、主成分比が、Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe₅O₁₂からなる組成のTbBi系ガーネット膜を厚さ約700μmに育成した。

【0310】次に、これらの試料の基板を除去し、約600μmの厚さに鏡面研磨した後、波長可変型分光計を用いて、波長が0.9~2.2μmの範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。その結果を図45に示す。なお、これらの試料の両面について、各5点ずつEPM分析を行い、その平均値として求めたものが、上記組成値である。

【0311】図45に、ガーネット厚膜の波長と透過率との関係を示す。尚、図中、実線はGdBi系ガーネット、破線はTbBi系ガーネットについての各厚膜の透

過率と波長の関係を示す。

【0312】図45において、GdB i系ガーネットにおいては、波長約1.2 μ m以上の領域で高い透過性を示している。一方、TbBi系ガーネット厚膜においては、高い透過性を示す波長帯域は、約1.2~1.5 μ mの範囲である。従って、1.5 μ m以上の波長帯域においては、GdB i系ガーネットが特に有用となる。

【0313】なお、該GdB i系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.55 μ mにおけるファラデー回転角が約45degとなる厚さに調整した後、SiO₂による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約500Oeまで印加し、波長1.55 μ mにおける挿入損失(I.L.)、ファラデー回転角 θ_F 、飽和磁界H_sを求めた。

【0314】又、同様にして、温度を変化し、ファラデー回転角の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度T_{comp}を求めた。

【0315】その結果、I.L.は0.09dB、H_sは約400Oe、 θ_F は約1100deg/cm、 θ_F/T は約0.06deg/°C、T_{comp}は-40°C以下であった。

【0316】従って、該GdB i系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子として、極めて有用であるといえる。

【0317】(実施例46) 実施例45と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{1.5}Yb_{0.1}Bi_{1.3}Fe_{4.3}(Al_a,Ga_b)_{0.7}O₁₂でa/(a+b)=0,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,0.60,0.70,0.80,0.90,1.00なる組成のGdB iガーネット膜を厚さ約600 μ mに育成した後、試料を作製し、測定した。

【0318】その結果、全ての試料について、H_sは約400Oe、 θ_F は約1200deg/cm、 θ_F/T は約0.05deg/°Cであった。

【0319】また、組成比a/(a+b)とT_{comp}及びI.L.との関係を図46に示す。

【0320】図46から、a/(a+b)の増加により、T_{comp}は低下する傾向を示し、a/(a+b)が0.05ではT_{comp}は-20°Cよりも著しく低い値となっていることがわかる。なお、a/(a+b)が0.2以上では、T_{comp}は-40°C以下であることは確認できたが、数値化が困難であったので、図中には<-40°Cとして示した。また、I.L.はa/(a+b)が0.9以上で著しく増加する傾向を示す。

【0321】従って、組成比a/(a+b)は、0.05 \leq a/(a+b) \leq 0.90の範囲が有用といえる。なお、a/(a+b)が0.90を越える領域でI.L.が増大するのは、ガーネット結晶の結晶格子の歪み、イオンバランスのばらつきに起因しているとは推定される。

【0322】(実施例47) 実施例46と同様にして、NGG基板上に主成分比が、Gd_{1.6-x}Yb_xBi_{1.4}F

e_{4.0}Al_{0.6}Ga_{0.4}O₁₂で、x=0,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,0.60なる組成のGdB iガーネット膜を厚さ約600 μ m育成した後、試料を作製し、測定した。

【0323】その結果、全ての試料について、 θ_F は約1300deg/cm、 θ_F/T は0.04~0.07deg/°C、T_{comp}は-40°C以下であった。

【0324】また、組成値xとH_s及びI.L.との関係を図47に示す。

【0325】図47から、組成値xの増加によりI.L.は減少する傾向を示す。また、H_sはxの増加により向上し、xが0.50を越えるとH_sは、500Oe以上となる。

【0326】従って、xの組成値は、0<x \leq 0.50の範囲が有用といえる。

【0327】(実施例48) 実施例46と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{2.8-y}Yb_{0.2}Bi_yFe_{4.1}Al_{0.6}Ga_{0.3}O₁₂で、y=0.80,0.90,1.00,1.10,1.20,1.30,1.40,1.50,1.60,1.70なる組成のGdB iガーネット膜を厚さ約700 μ mに育成した後、試料を作製し、測定した。

【0328】その結果、全ての試料について、H_sは約200~450Oe、 θ_F/T は約0.04~0.07deg/°C、T_{comp}は-40°C以下であった。

【0329】また、組成値yと θ_F 及びI.L.との関係を図48に示す。

【0330】図48から、 θ_F が800deg/cm以上は、yが0.85以上で得られている。また、I.L.はyが1.60を越えると著しく増加する傾向を示す。

【0331】従って、yの組成値は、0.85 \leq y \leq 1.60の範囲が有用といえる。なお、yが1.60を越える領域で、I.L.が増大するのは、ガーネット結晶の結晶格子の歪み、イオンバランスのばらつきに起因しているとは推定される。

【0332】(実施例49) 実施例46と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{1.5}Yb_{0.2}Bi_{1.3}Fe_{5-z}(Al_{0.8}Ga_{0.2})_zO₁₂で、z=0,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,0.60,0.70,0.80,0.90,1.00,1.10なる組成のGdB iガーネット膜を厚さ約600 μ mに育成した後、試料を作製し、測定した。

【0333】その結果、全ての試料について、 θ_F は約1200deg/cm、 θ_F/T は約0.04~0.06deg/°C、T_{comp}は-40°C以下であった。

【0334】また組成値zとH_s及びI.L.との関係を図49に示す。

【0335】図49から、H_sが500Oe以下はzが0.20以上で得られる。また、I.L.はzが1.00以上で急激に増加している。

【0336】従って、 z の組成値は、 $0.20 \leq z \leq 1.00$ の範囲が有用といえる。なお、 z が1.00を越える領域で、I.L.が増大するのは、ガーネット結晶の結晶格子の歪み、イオンバランスのばらつきに起因していると推定される。

【0337】(実施例50) 実施例46と同様にして、主成分比が、 $Gd_{1.2}Yb_{0.3}Bi_{1.5}Fe_{4.0}Al_{0.8}Ga_{0.1}O_{12}$ なる組成のガーネット膜を厚さ約500 μm に育成した。

【0338】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で、10時間保持する熱処理を施した。

【0339】次に、これらの試料を、波長1.55 μm におけるファラデー回転角が、約45degとなる厚さに調整(約300 μm)した後、第1の実施の形態と同様にして、各特性を測定した。

【0340】その結果、全ての試料について、 H_s は約4500e、 θ_F は約1400deg/cm、 $\theta_{F/T}$ は約0.04deg/℃、 T_{comp} は約-40℃であった。

【0341】また、I.L.と熱処理温度との結果を図50に示す。

【0342】図50から、熱処理温度が950~1140℃の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0343】従って、950~1140℃の温度範囲での熱処理が有用といえる。

【0344】(実施例51) 実施例46と同様にして、主成分比が、 $Gd_{1.9}Yb_{0.1}Bi_{1.0}Fe_{4.5}Al_{0.4}Ga_{0.1}O_{12}$ なる組成のガーネット膜を厚さ約600 μm に育成した。

【0345】次に、この試料を、1050℃の各温度で、雰囲気酸素濃度を、0、10、20、40、60、80、100%とし、20時間保持する熱処理をした後、試料を作製し、各特性を測定した。

【0346】その結果、全ての試料について、 H_s は約3500e、 θ_F は約950deg/cm、 $\theta_{F/T}$ は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0347】また、I.L.と雰囲気酸素濃度との関係を図51に示す。

【0348】図51から、雰囲気酸素濃度が、10~100%の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0349】従って、10~100%の範囲の熱処理雰囲気の酸素濃度が有用といえる。

【0350】(実施例52) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)、酸化イットルビウム(Yb_2O_3)、酸化第二鉄(Fe_2O_3)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、酸化ガリウム(Ga_2O_3)、酸化ビスマス(Bi_2O_3)、酸化鉛(PbO)および酸化ホウ素(B_2O_3)

の粉末を原料として使用し、 $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$ 系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、 PbO を約0.5wt%含有した、主成分比が、 $Gd_{1.4}Yb_{0.3}Bi_{1.3}Fe_{4.2}Al_{0.2}Ga_{0.6}O_{12}$ で、 B_2O_3 を0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0wt%含有する組成のGdBi系ガーネット膜を厚さ約500 μm 育成した。

【0351】次に、これらの試料の基板を除去し、両面を研磨し、波長1.55 μm におけるファラデー回転角が、約45degとなる厚さに調整した。なお、上述した組成は、これらの試料の両面について、5点ずつEPMA分析を行い、その平均値として求めたものであり、 B_2O_3 については、試料片を原子吸光分析法により求めたものである。

【0352】次に、これらの試料板に SiO_2 膜による無反射被覆処理を行った後、電磁石を用いて磁界を約0.5kOeまで印加していき、波長1.55 μm において、透過率が飽和に達する最小の印加磁界(飽和磁界 H_s)と挿入損失(I.L.)、及びファラデー回転能 θ_F 、及び-20℃~+80℃の間における θ_F の温度変化率 $\theta_{F/T}$ を求めた。

【0353】その結果、全ての試料について、 H_s 約4000e、 θ_F 約1200deg/cm、 $\theta_{F/T}$ 約0.05deg/℃、 T_{comp} -40℃以下であった。

【0354】また、I.L.と B_2O_3 含有量との関係を図52に示す。

【0355】図52からわかるように、I.L.は、 B_2O_3 の含有により減少し、4.0wt%を越える領域で著しく増加することがわかる。このことにより、I.L.の低減効果は、0~4.0wt%(但し、0を含まず)の範囲で認められる。

【0356】従って、 B_2O_3 の含有量は、0~4.0wt%(但し、0を含まず)の範囲が有用となる。特に、1~3.2wt%の範囲が好ましい。

【0357】(実施例53) 実施例52と同様にして、 B_2O_3 を約0.5wt%含有した、主成分比が、 $Gd_{1.7}Yb_{0.2}Bi_{1.1}Fe_{4.5}Al_{0.3}O_{12}$ で、 PbO を0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0wt%含有する組成のGdBi系ガーネット膜を厚さ約600 μm 育成した後、試料を作製し、測定した。

【0358】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約1100deg/cm、 $\theta_{F/T}$ は約0.06deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0359】また、I.L.と PbO 含有量との関係を図53に示す。

【0360】図53から、 PbO の含有により、I.L.は減少し、 PbO が4.0wt%を越える領域で、I.L.は著しく増加していることがわかる。

【0361】従って、 PbO の含有量は、0~4.0w

t% (0を含まず)の範囲が有用といえる。さらに、望ましくは、PbOが0.2~4.0wt%の範囲とすることにより、I.L.を0.08dB以下とすることができ。なお、特に、1.0~3.5wt%の範囲が好ましい。

【0362】(実施例54) 実施例52態と同様にして、主成分比が、 $Gd_{1.1}Yb_{0.4}Bi_{1.5}Fe_{4.1}Al_{0.4}Ga_{0.5}O_{12}$ で、 B_2O_3 を約0.7wt%、PbOを約0.7wt%含有するガーネット厚膜を厚さ約500 μm に育成した。

【0363】次に、この試料を、約50%の酸素濃度雰囲気中で、950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1130℃、1150℃の各温度で10時間保持する熱処理をした。

【0364】次に、これらの試料の両面について研磨し、波長1.55 μm におけるファラデー回転角が約45 degとなる厚さに調整した後、試料を作製し測定した。

【0365】その結果、全ての試料について、 H_s は約5000e、 θ_F は約1400 deg/cm、 θ_F/T は約0.04 deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0366】また、I.L.と熱処理温度との結果を図54に示す。

【0367】図54から、熱処理温度が950~1140℃の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、950~1140℃の温度範囲での熱処理が有用といえる。

【0368】(実施例55) 実施例52と同様にして、主成分比が、 $Gd_{2.0}Yb_{0.1}Bi_{0.9}Fe_{4.7}Al_{0.2}Ga_{0.1}O_{12}$ で、 B_2O_3 を約1.5wt%、PbOを約1.5wt%含有するガーネット膜を厚さ約700 μm に育成した。

【0369】次に、この試料を、1050℃の温度で、雰囲気酸素濃度を、0、10、20、40、60、80、100%とし、20時間保持して熱処理した後、試料を作製し、測定した。

【0370】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_F は約900 deg/cm、 θ_F/T は約0.07 deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0371】また、I.L.と熱処理温度との関係を図55に示す。

【0372】図55から、熱処理雰囲気酸素濃度が10~100%の範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。従って、10~100%の熱処理雰囲気酸素濃度が有用といえる。

【0373】(実施例56) 高純度の酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)、酸化イッテルビウム(Yb_2O_3)、酸化ガリウム(Ga_2O_3)、酸化テルビウム(Tb_2O_3)、酸化第二鉄($\gamma-Fe_2O_3$)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、酸化ビスマス(Bi_2O_3)、酸化鉛(Pb

O)、酸化ホウ素(B_2O_3)及び酸化白金(PtO_2)の粉末を原料として使用し、PbO- Bi_2O_3 - B_2O_3 系をフラックスとして、LPE法にて、NGG基板(格子定数12.509オングストローム)上に、主成分比が $Gd_{1.4}Yb_{0.3}Bi_{1.3}Fe_{4.3}Al_{0.2}Ga_{0.5}O_{12}$ で、 B_2O_3 を約1.5wt%、PbOを約0.5wt%、 PtO_2 を約1.0wt%含有する組成のGdBi系ガーネット厚膜を厚さ約700 μm 育成した。

【0374】また、同様にして、SGG基板(格子定数12.496オングストローム)上に、主成分比が、 $Tb_{2.0}Bi_{1.0}Fe_{5.0}O_{12}$ からなる組成のTbBi系ガーネット膜を厚さ約700 μm に育成した。

【0375】次に、これらの試料の基板を除去し、両面を研磨して約600 μm の厚さに鏡面研磨した後、波長可変型分光計を用いて波長が0.9~2.2 μm の範囲におけるガーネット厚膜の光透過率を測定した。

【0376】また、これらの試料の両面について、各5点ずつEPMA分析を行い、その平均値として求めたものが上記組成値である。なお、 B_2O_3 は、試料片を原子吸光分析により求めたものである。

【0377】図56に、ガーネット厚膜の波長と透過率との関係を示す。尚、図中、実線はGdBi系ガーネット、破線はTbBi系ガーネットについての各厚膜の透過率と波長の関係を示す。

【0378】図56において、GdBi系ガーネットは、波長約1.2 μm 以上の領域で高い透過性を示している。一方、TbBi系ガーネット厚膜においては、高い透過性を示す波長帯域は、約1.2~1.5 μm の範囲である。従って、1.5 μm 以上の波長帯域においては、GdBi系ガーネットが特に有用となる。

【0379】なお、該GdBi系ガーネット厚膜について、試料の両面を研磨し、波長1.55 μm におけるファラデー回転角が約45 degとなる厚さに調整した後、 SiO_2 による無反射被覆処理を行い、電磁石を用いて磁界を約5000eまで印加し、波長1.55 μm における挿入損失(I.L.)、ファラデー回転角 θ_F 、飽和磁界 H_s を求めた。

【0380】また、同様にして、温度を変化させ、ファラデー回転角の温度変化率 θ_F/T 、磁化の反転温度 T_{comp} を求めた。

【0381】その結果、I.L.は0.05 dB、 H_s は約4000e、 θ_F は約1200 deg/cm、 θ_F/T は約0.05 deg/℃、 T_{comp} は-40℃以下であった。

【0382】従って、該GdBi系ガーネット厚膜は、ファラデー回転素子として、極めて有用であるといえる。

【0383】(実施例57) 実施例56と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、 $Gd_{1.7}Yb_{0.2}Bi_{1.1}Fe_{4.4}Al_{0.3}Ga_{0.3}O_{12}$ で、 B_2O_3 を約0.5wt%、PbOを約0.5wt%とし PtO_2 を0、1.0、

2.0, 3.0, 4.0, 5.0含有した組成のGdB i系ガーネット厚膜を厚さ約500 μ mに育成した後、試料を作製し、測定した。

【0384】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_f は約1200deg/cm、 $\theta_{f/T}$ は約0.06deg/°C、 T_{comp} は-40°C以下であった。

【0385】また、I.L.とPtO₂との関係を図57に示す。

【0386】図57から、PtO₂の増加により、I.L.は減少する傾向を示し、PtO₂が4.0wt%を越える領域でI.L.が著しく増加している。

【0387】従って、PtO₂の含有量は、 $0 < PtO_2 \leq 0.40wt\%$ の範囲が有用といえる。なお、特に、0.4~3.8wt%の範囲が好ましい。

【0388】(実施例58) 実施例56と同様にして、NGG基板上に主成分比が、Gd_{1.1}Yb_{0.4}Bi_{1.5}Fe_{4.1}Al_{0.5}Ga_{0.4}O₁₂で、PbOを約3.5wt%、PtO₂を約0.5wt%含有するGdB i系ガーネット厚膜を厚さ約500 μ m育成した後、この試料を約50%の酸素濃度雰囲気中で950°C、1000°C、1050°C、1100°C、1130°C、1150°Cの各温度で10時間保持する熱処理をした。

【0389】次に、これらの試料の両面を研磨し、波長1.55 μ mにおけるファラデー回転が約45degとなる厚さにした後、試料を作製し、測定した。

【0390】その結果、全ての試料について、 H_s は約5000e、 θ_f は約1400deg/cm、 $\theta_{f/T}$ は約0.04deg/°C、 T_{comp} は-40°C以下であった。

【0391】また、I.L.と熱処理温度との関係を図58に示す。

【0392】図58から、熱処理温度が950~1140°Cの範囲で、熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0393】従って、950~1140°Cの範囲での熱処理が有用といえる。

【0394】(実施例59) 実施例56と同様にして、NGG基板上に、主成分比が、Gd_{2.0}Yb_{0.1}Bi_{0.9}Fe_{4.7}Al_{0.2}Ga_{0.1}O₁₂で、B₂O₃を約3.5wt%、PtO₂を約3.5wt%含有するGdB i系ガーネット厚膜を厚さ約600 μ mに育成した。

【0395】次に、この試料を1050°Cの温度で、雰囲気酸素濃度を0, 10, 20, 40, 60, 80, 100%とし、20時間保持する熱処理をした後、試料を作製し、測定した。

【0396】その結果、全ての試料について、 H_s は約4000e、 θ_f は約900deg/cm、 $\theta_{f/T}$ は約0.07deg/°C、 T_{comp} は-40°C以下であった。

【0397】また、I.L.と熱処理温度との関係を図59に示す。

【0398】図59から、熱処理雰囲気酸素濃度が1

0~100%の範囲で熱処理によるI.L.の低減効果が認められる。

【0399】従って、10~100%の範囲の熱処理雰囲気酸素濃度が有用といえる。

【0400】

【発明の効果】以上、説明したように、本発明によれば、TbBi系ガーネットが本質的に持っている波長約1.6 μ m以上での吸収を忌避するものであり、GdB i系ガーネットの θ_f の温度変化率の改善したビスマス置換型ガーネット厚膜材料及びその製造方法を提供することができる。

【0401】また、本発明によれば、波長の中でも、約1.5 μ mを越える波長帯域で使用できるファラデー回転素子を提供することができる。

【0402】また、本発明によれば、前記ファラデー回転素子からなることを特徴とする光アイソレータを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】実施例1において、LPE法によって育成したGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜およびTbBi系ガーネット単結晶厚膜の透過率の波長依存性を示す図。図中、実線はGdYbBi系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図2】実施例2におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料についての各測定結果を示す図。図2(a)は飽和磁化4 πM_s の測定結果を、また、図2(b)はファラデー回転角の温度係数 $\theta_{f/T}$ の値を、それぞれ示す図。

【図3】実施例3におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料についての各測定結果を示す図。図3(a)はファラデー回転能の測定結果を、また、図3(b)は挿入損失を、それぞれ示す図。

【図4】実施例4におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料についての各測定結果を示す図。図4(a)はファラデー回転角の温度係数 $\theta_{f/T}$ の測定結果を、また、図4(b)は飽和磁化を、それぞれ示す図。

【図5】実施例5におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料についての挿入損失を示す図。

【図6】実施例6におけるGdYbBi系ガーネット厚膜材料の挿入損失を示す図。

【図7】実施例7におけるガーネット厚膜についての光の波長と透過率の関係を示す図。図中、実線はGdYbBi系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図8】実施例8におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についてのPbOの含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図9】実施例9におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図10】実施例10におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図11】実施例11におけるガーネット厚膜についての光の波長と透過率の関係を示す図。図中、実線はGdYbBi系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図12】実施例12におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についてのB₂O₃の含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図13】実施例13におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図14】実施例14におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図15】実施例15におけるLPE法によって育成したGdYbBi系ガーネット単結晶厚膜およびTbBi系ガーネット単結晶厚膜についての透過率の波長依存性を示す図。図中、実線はGdYbBi系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図16】実施例16におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についてのPtO₂含有量とI.L.との関係を示す図。

【図17】実施例17におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についての熱処理温度とI.L.との関係を示す図。

【図18】実施例18におけるGdYbBi系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度とI.L.との関係を示す図。

【図19】実施例19におけるガーネット厚膜についての光の波長と透過率の関係を示す図。図中、実線はGdBi系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図20】実施例20におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのYb組成値と飽和磁界H_s及び挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図21】実施例21におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのBi組成値とファラデー回転能θ_F及び挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図22】実施例22におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのAl組成値と飽和磁界H_s及び挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図23】実施例23におけるGdBi系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図24】実施例24におけるGdBi系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図25】実施例25におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのB₂O₃の含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図26】実施例26におけるdBi系ガーネット厚膜についてのPbOの含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図27】実施例27におけるGdBi系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

10 【図28】実施例28におけるGdBi系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図29】実施例29におけるLPE法によって育成したGdBi系ガーネット単結晶厚膜およびTbBi系ガーネット単結晶厚膜についての透過率の波長依存性を示す図。図中、実線はGdBi系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

20 【図30】実施例30におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのPtO₂含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図31】実施例31におけるGdBi系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図32】実施例32におけるGdBi系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図33】実施例33におけるガーネット厚膜についての光の波長と透過率の関係を示す図。図中、実線はGdBi系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図34】実施例34におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのYb組成値と飽和磁界H_s及び挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図35】実施例35におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのBi組成値とファラデー回転能θ_F及び挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図36】実施例36におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのGa組成値とファラデー回転の温度変化率θ_{F/T}及び飽和磁界H_sの関係を示す図。

40 【図37】実施例37におけるGdBi系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図38】実施例38におけるGdBi系ガーネット厚膜について熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図39】実施例39におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのB₂O₃の含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

50 【図40】実施例40におけるGdBi系ガーネット厚膜についてのPbOの含有量と挿入損失(I.L.)との

関係を示す図。

【図41】実施例41におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのPtO₂含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図42】実施例42におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのB₂O₃、PbO、PtO₂の含有総量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図43】実施例43におけるGdB i系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図44】実施例44におけるGdB i系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図45】実施例45におけるガーネット厚膜についての光の波長と透過率の関係を示す図。図中、実線はGdB i系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図46】実施例46におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのAlとGaの組成比と磁化反転温度(T_{comp})及び挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図47】実施例47におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのYb組成値と飽和磁界H_s及び挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図48】実施例48におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのBi組成値とファラデー回転角θ_F及び挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図49】実施例49におけるGdB i系ガーネット厚膜についての(Al, Ga)組成値と飽和磁界H_s及び挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図50】実施例50におけるGdB i系ガーネット厚

膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)の関係を示す図。

【図51】実施例51におけるGdB i系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図52】実施例52におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのB₂O₃の含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図53】実施例53におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのPbOの含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図54】実施例54におけるGdB i系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図55】実施例55におけるGdB i系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

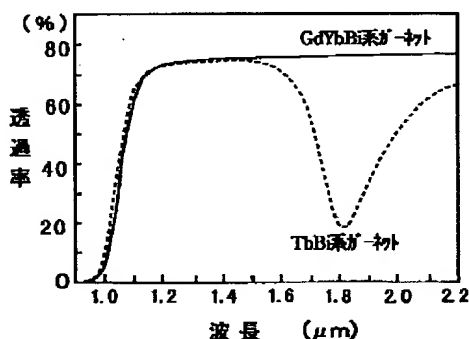
【図56】実施例56におけるガーネット厚膜についての光の波長と透過率の関係を示す図。図中、実線はGdB i系ガーネット厚膜、破線はTbBi系ガーネット厚膜に対する特性を示す。

【図57】実施例57におけるGdB i系ガーネット厚膜についてのPtO₂含有量と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

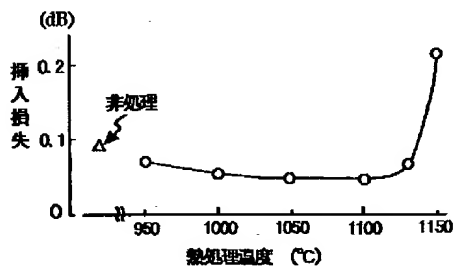
【図58】実施例58におけるGdB i系ガーネット厚膜についての熱処理温度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

【図59】実施例59におけるGdB i系ガーネット厚膜についての熱処理雰囲気酸素濃度と挿入損失(I.L.)との関係を示す図。

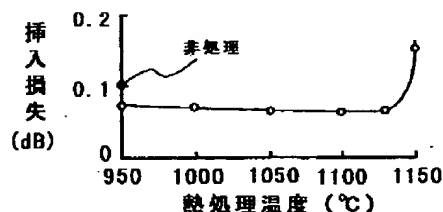
【図1】



【図5】

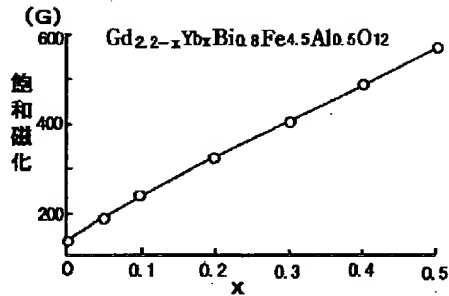


【図23】

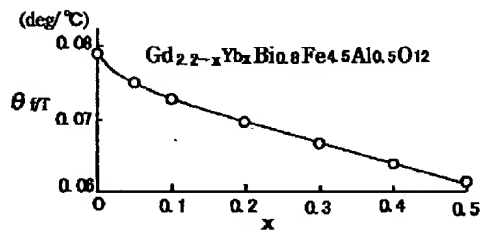


【図2】

(a)

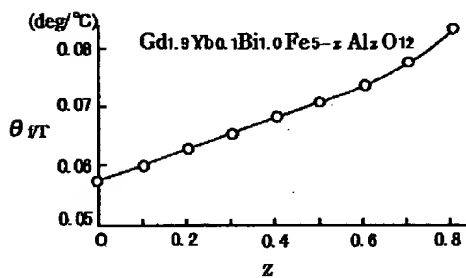


(b)

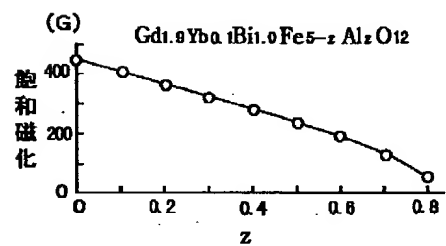


【図4】

(a)

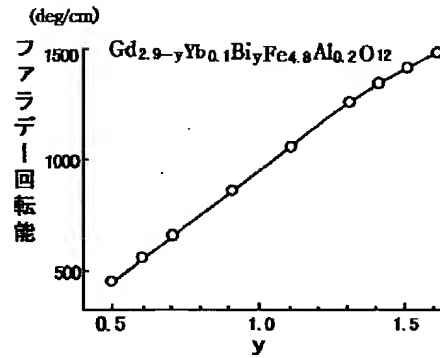


(b)

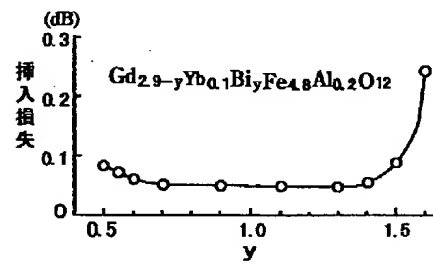


【図3】

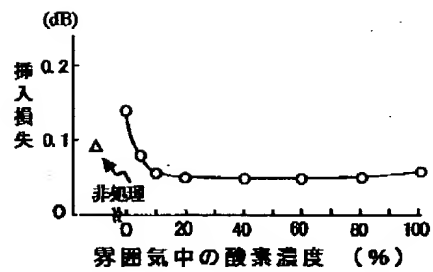
(a)



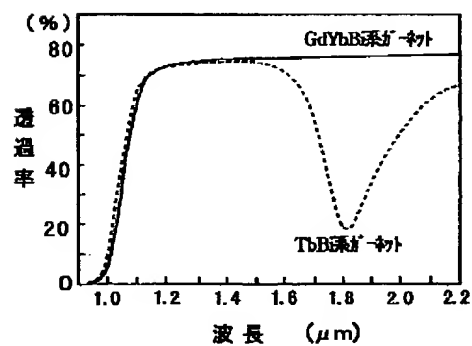
(b)



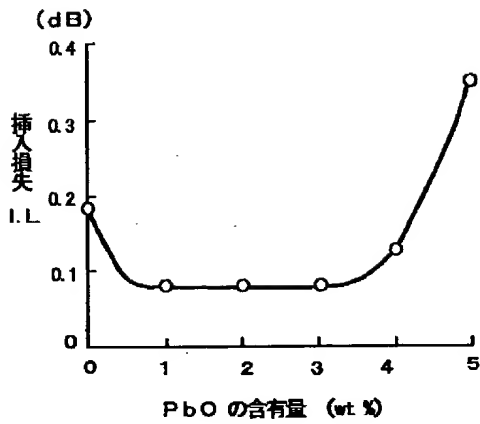
【図6】



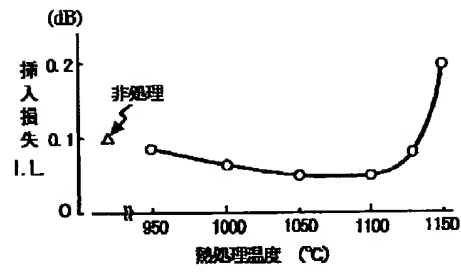
【図7】



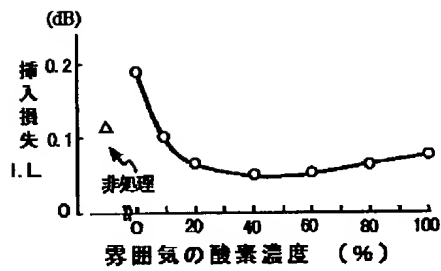
【図8】



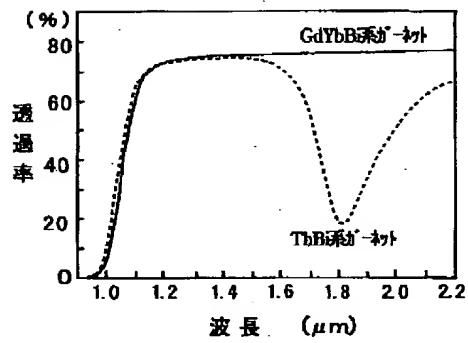
【図9】



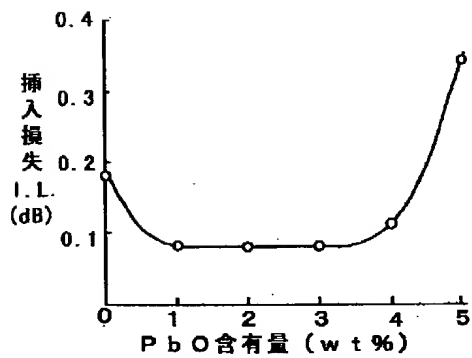
【図10】



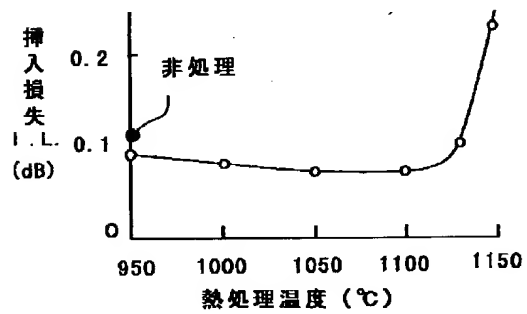
【図11】



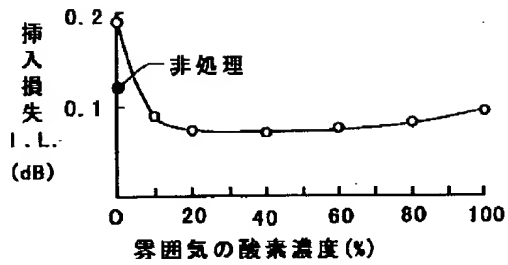
【図12】



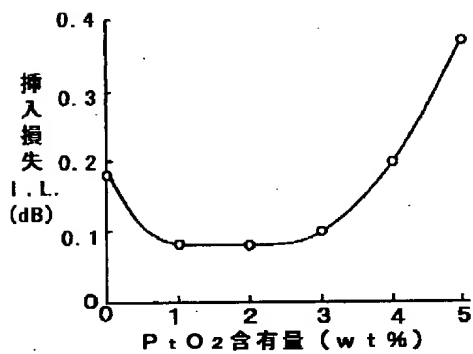
【図13】



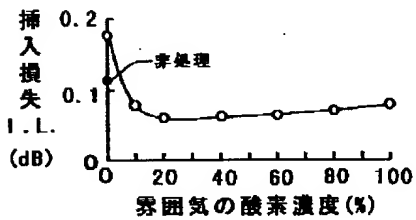
【図14】



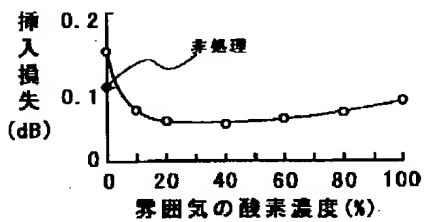
【図16】



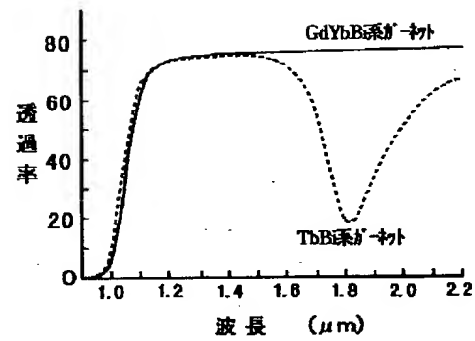
【図18】



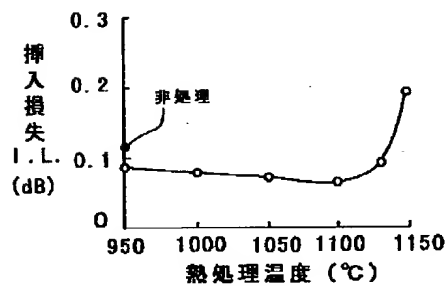
【図24】



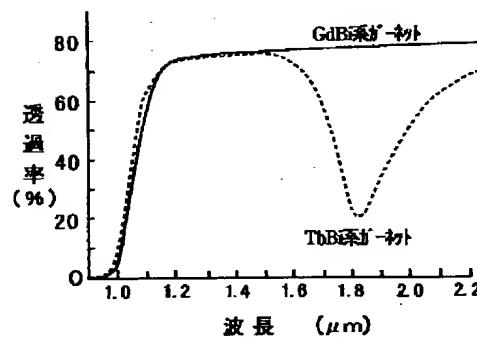
【図15】



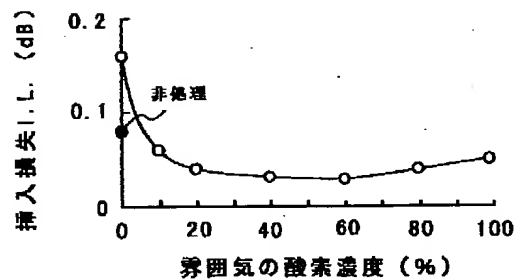
【図17】



【図19】

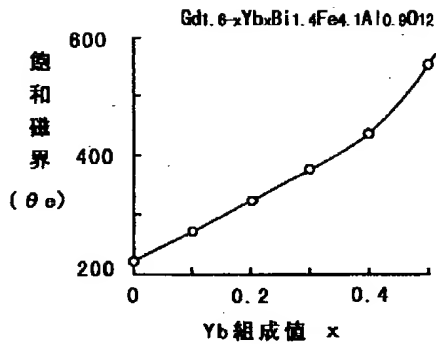


【図32】

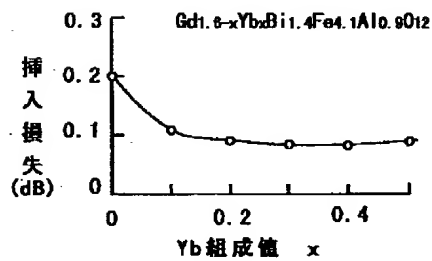


【図20】

(a)

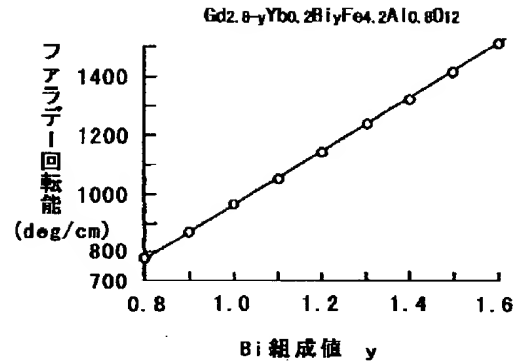


(b)

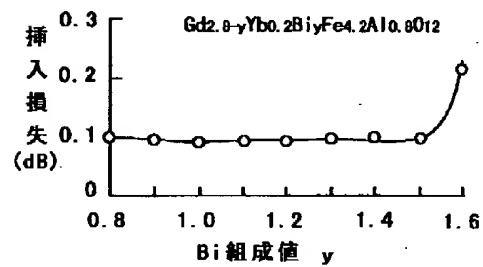


【図21】

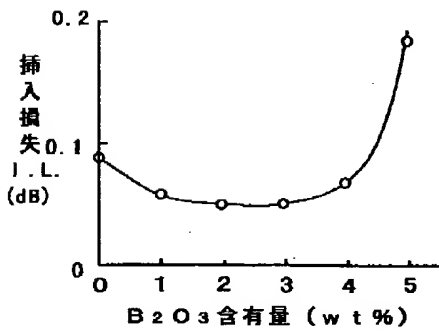
(a)



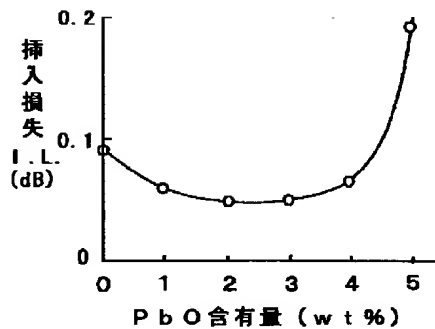
(b)



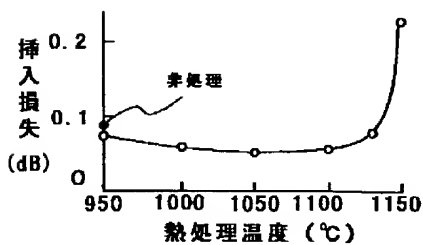
【図25】



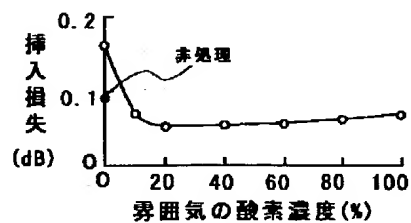
【図26】



【図37】

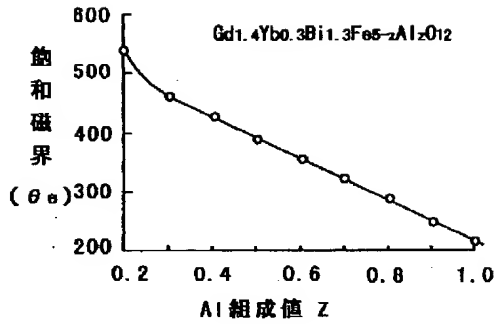


【図38】

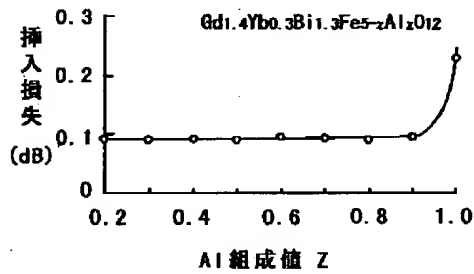


【図22】

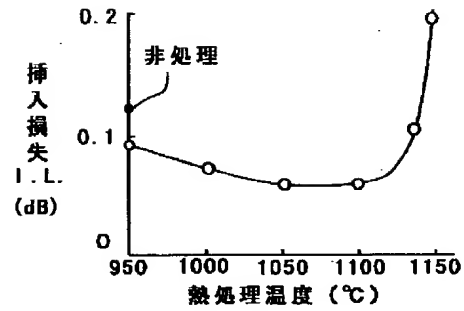
(a)



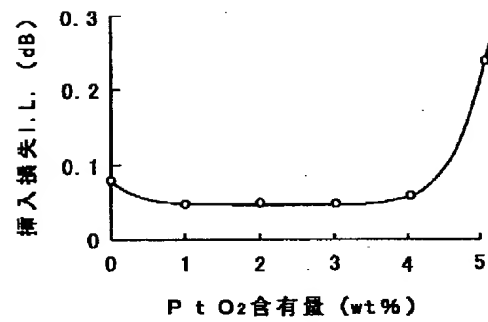
(b)



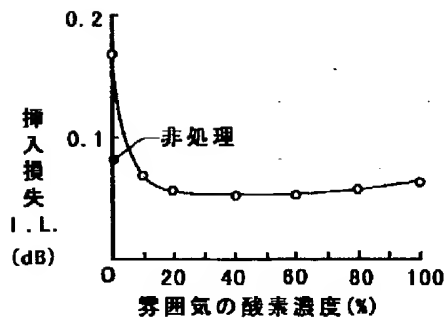
【図27】



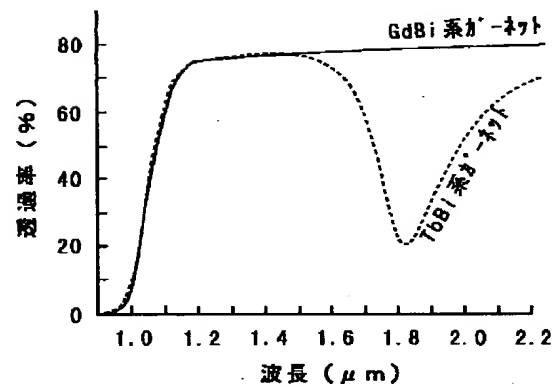
【図30】



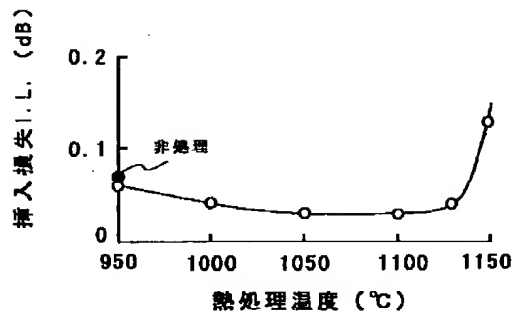
【図28】



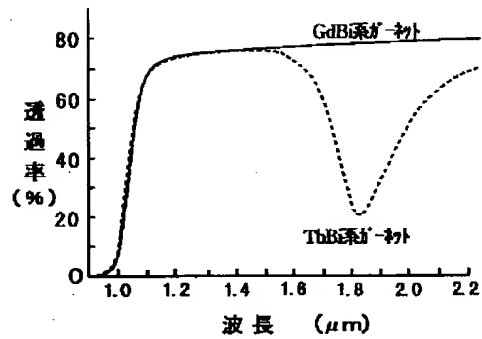
【図29】



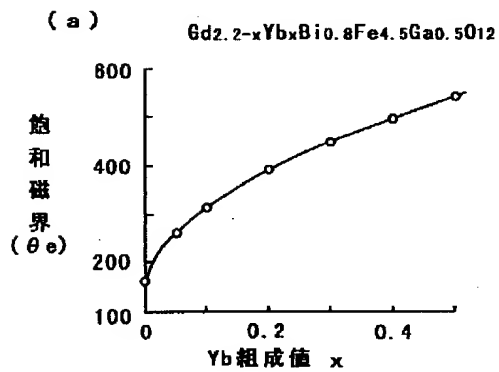
【図31】



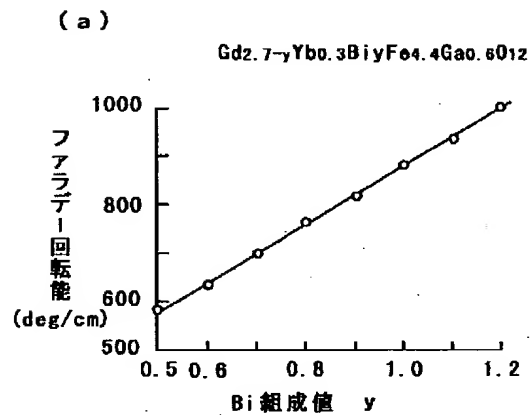
【図33】



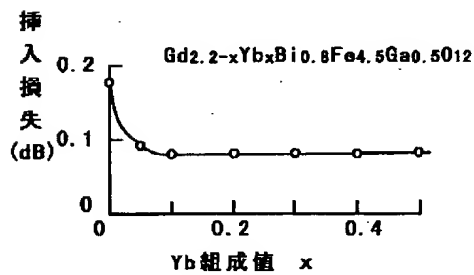
【図34】



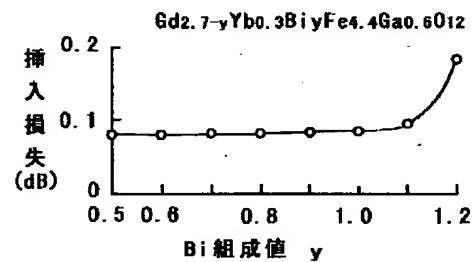
【図35】



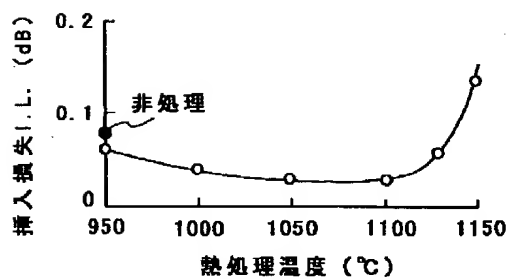
(b)



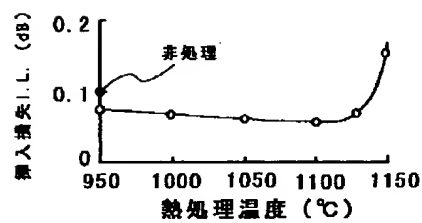
(b)



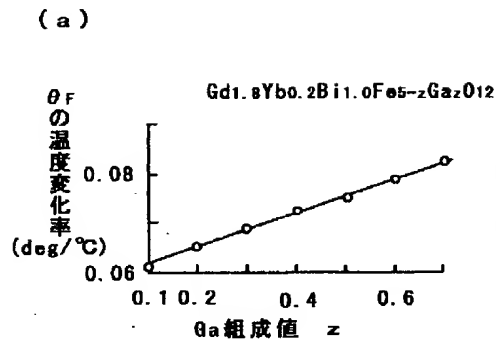
【図43】



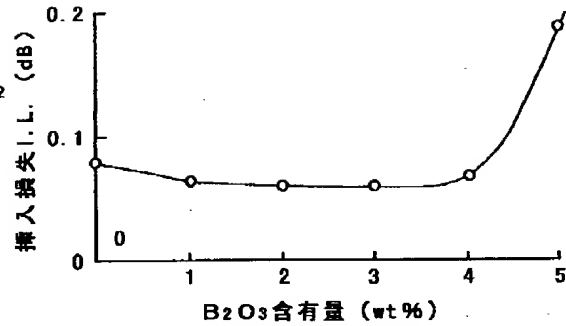
【図50】



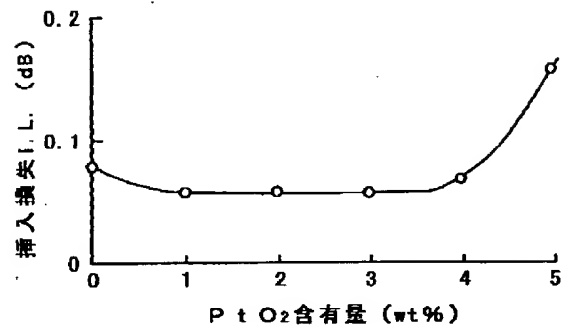
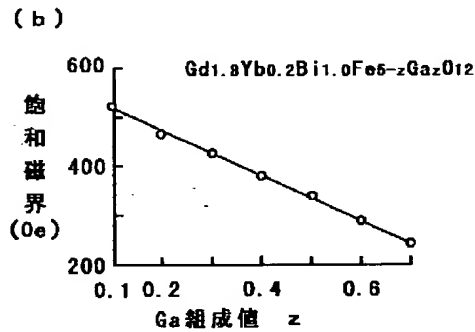
【図36】



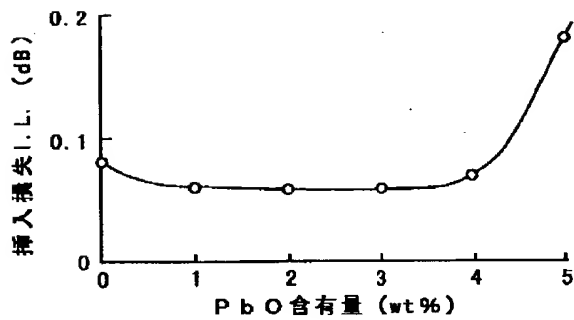
【図39】



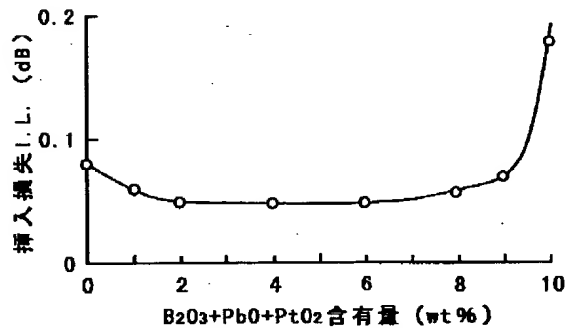
【図41】



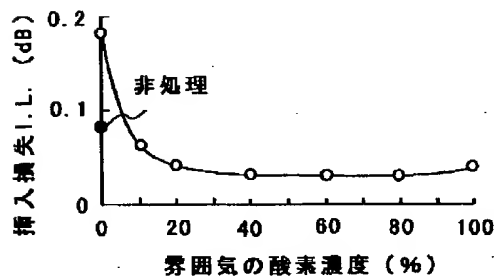
【図40】



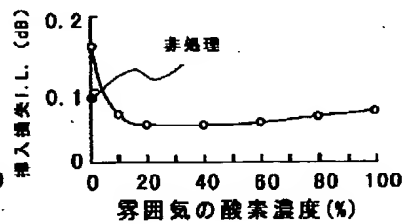
【図42】



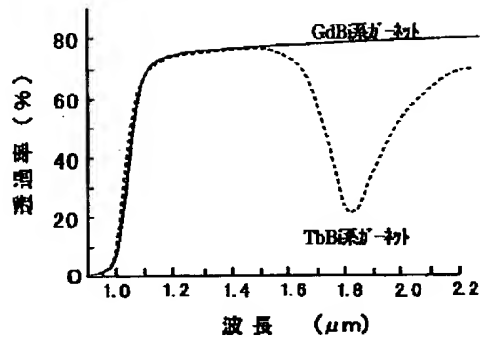
【図44】



【図51】

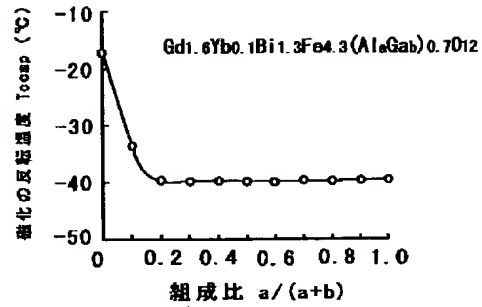


【図45】

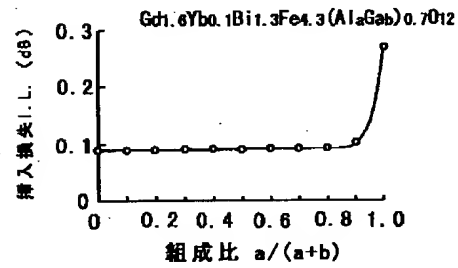


【図46】

(a)

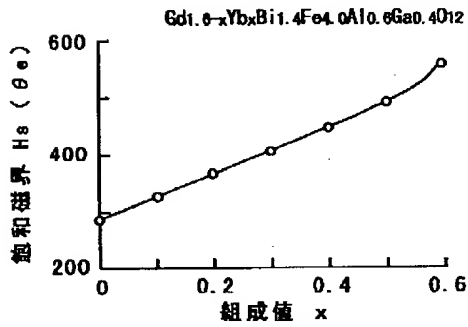


(b)

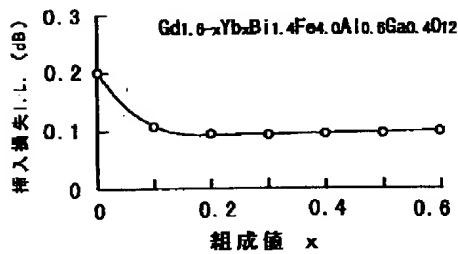


【図47】

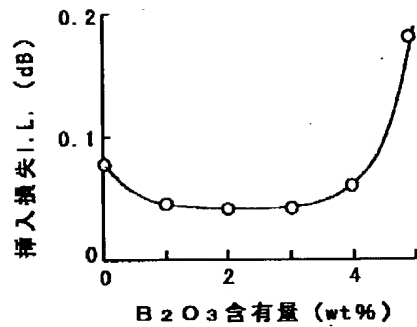
(a)



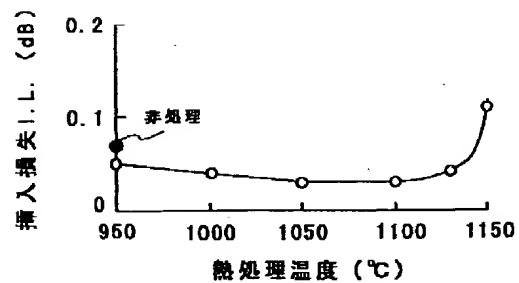
(b)



【図52】

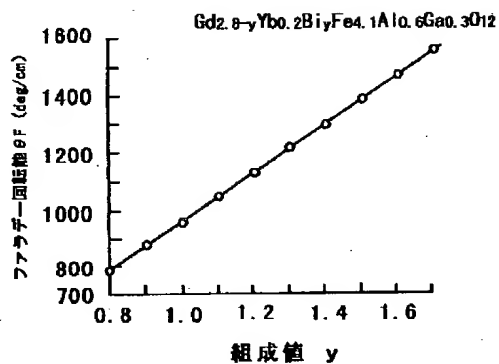


【図58】

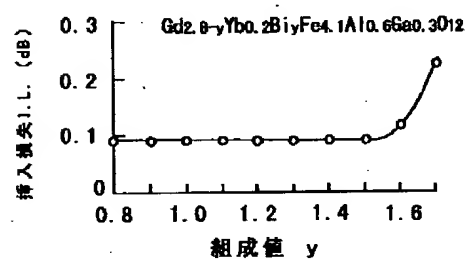


【図48】

(a)

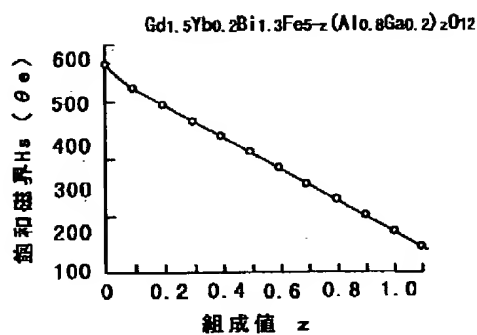


(b)

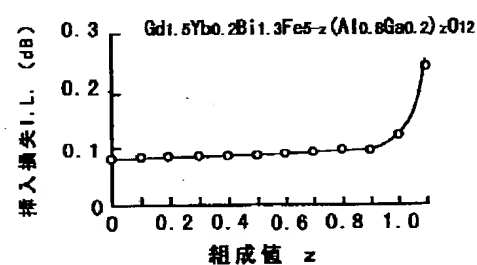


【図49】

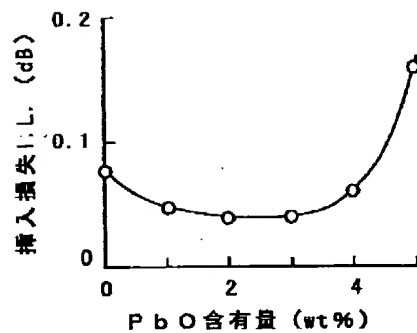
(a)



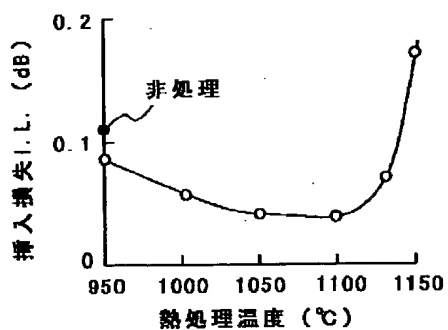
(b)



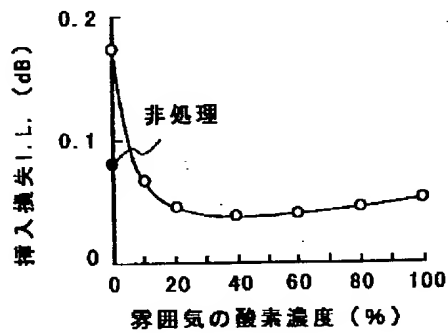
【図53】



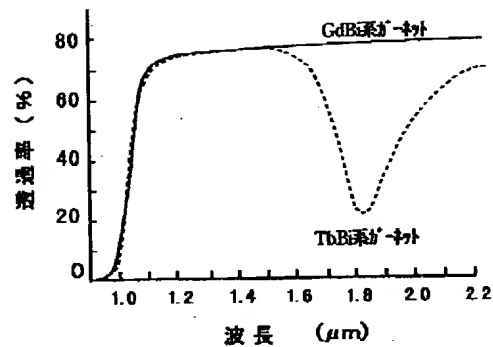
【図54】



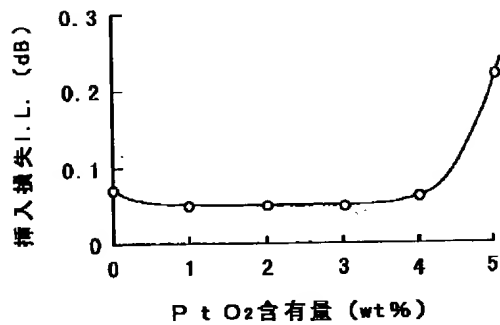
【図55】



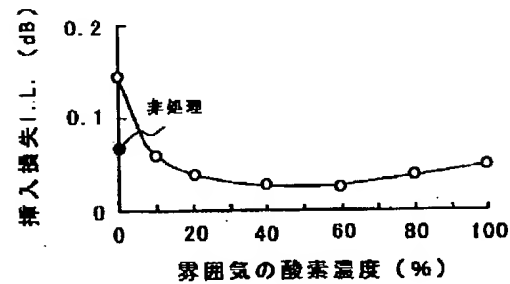
【図56】



【図57】



【図59】



フロントページの続き

(31)優先権主張番号 特願平10-134340
 (32)優先日 平成10年4月28日(1998. 4. 28)
 (33)優先権主張国 日本(JP)
 (31)優先権主張番号 特願平10-152213
 (32)優先日 平成10年5月14日(1998. 5. 14)
 (33)優先権主張国 日本(JP)

(31)優先権主張番号 特願平10-165920
 (32)優先日 平成10年5月29日(1998. 5. 29)
 (33)優先権主張国 日本(JP)
 (31)優先権主張番号 特願平10-194990
 (32)優先日 平成10年6月24日(1998. 6. 24)
 (33)優先権主張国 日本(JP)
 (31)優先権主張番号 特願平10-211923
 (32)優先日 平成10年7月10日(1998. 7. 10)
 (33)優先権主張国 日本(JP)